



Universidad  
Carlos III de Madrid

# **PROYECTO FIN DE CARRERA**

# **BIODIGESTOR**

# **ANAEROBIO DE**

# **LABORATORIO**

Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e  
Ingeniería Química

---

**Autor: Fco. Javier Ocaña Pérez-Cerdá**

**Tutor: Antonio Aznar Jiménez**

**Leganés, Octubre de 2011**



Título: Biodigestor anaerobio de laboratorio

Autor: Fco. Javier Ocaña Pérez-Cerdá

Director: Antonio Aznar Jiménez

## EL TRIBUNAL

Presidente: Prof. Dr. D. Javier POZUELO

Vocal: Prof. D. Juan Ignacio LÓPEZ

Secretario: Prof. Dr. D<sup>a</sup>. Olga MARTÍN CÁDIZ

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 19 de Octubre de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

# Agradecimientos

Dedicado a mis padres y a mis hermanas.

A mis abuelos, mis tíos, primos y resto de mi familia.

A todos mis amigos.

Y a mí. El que resiste, gana.

# Resumen

Este proyecto se basa en el diseño y construcción de un biodigestor anaerobio de laboratorio, así como su puesta en marcha y aplicación práctica por medio de la realización de un experimento, en el que se analizará la producción de biogás a diferentes temperaturas de digestión, en concreto a 25°C, 30°C y 35°C. De este modo se ha determinado la influencia de la temperatura en la calidad y cantidad del biogás producido, así como su influencia en otros parámetros. Para ello se han realizado una serie de 4 experimentos en los que se han controlado parámetros como el pH, la DQO, los contenidos de fósforo y nitrógeno y volumen de biogás producido, entre otros. Este caso práctico servirá como prueba del correcto funcionamiento del biodigestor, y a su vez servirá en sí mismo como un estudio sobre la producción de biogás en este tipo de digestores con diferentes condiciones de temperatura.

De este modo, el proyecto podrá servir como guía para la construcción de biodigestores similares, así como manual para su uso correcto, con recomendaciones y consejos prácticos. Además, las conclusiones obtenidas en los experimentos, servirán para posteriores ensayos.

Por otro lado se plantean posibles experimentos y aplicaciones futuras, sirviendo de este modo el biodigestor no solo para la realización de este proyecto, sino para posteriores usos y aplicaciones del mismo.

**Palabras clave:** biodigestor anaerobio, biogás, metanización, mesofílico, pH, temperatura, eficiencia de remoción, tiempo de retención hidráulico.

# Abstract

This project is based on the design and construction of a laboratory anaerobic digester and its implementation and practical application by conducting an experiment which analyzed the production of biogas during the digestion at different temperatures in concrete at 25°C, 30°C and 35°C. This has determined the influence of temperature on the quality and quantity of produced biogas, and its influence on other parameters. For this have been made a series of 4 experiments in which several parameters as pH, COD, phosphorus and nitrogen content and volume of biogas produced, among others, were monitored. This case study will serve as proof of proper functioning of the digester, and in turn serve itself as a study of the production of biogas digesters at different temperatures conditions.

Thereby, the project will serve as a guide for building similar digesters, as well as a manual for proper use, with recommendations and tips. Furthermore, the conclusions obtained in the experiments, will serve for further testing.

On the other hand, are present possible future experiments and applications, so serving not only the digester for this project but for future uses and applications of it.

**Keywords:** anaerobic digester, biogas, anaerobic digestion, mesophilic, pH, temperature, removal efficiency, hydraulic retention time.



## ÍNDICE

1.1	Conceptos básicos digestión anaerobia	10
1.2	Corrientes residuales a tratar	30
1.3	Tipos de tecnología digestores anaerobios	30
2.	INTRODUCCIÓN GENERAL A PLANTA DISCONTINUA EN LABORATORIO	48
2.1	Planta discontinua en laboratorio	48
2.2	Implantación de un biodigestor de laboratorio	52
3.	DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LABORATORIO	53
3.1	Sistema completo	53
3.2	Instalaciones e instrumentación del laboratorio	66
4.	RESULTADOS DEL EXPERIMENTO: DIGESTIÓN SE ESTIERCOL VACUNO A DISTINTAS TEMPERATURAS	70
4.1	Discusión y análisis de resultados	70
4.2	Substrato de partida: Medición de sólidos	71
4.3	Mezcla digestor: Temperatura	76
4.4	Mezcla digestor: pH	77
4.5	Mezcla digestor: DQO	85
4.6	Mezcla digestor: Fósforo y Nitrógeno	87
4.7	Gas: Volumen de gas producido	89
4.8	Gas: Composición del biogás	99
4.9	Gas: Calorimetría	102
4.10	Otras medidas	106
5.	DESARROLLOS FUTUROS Y APLICACIONES	106
6.	CONCLUSIONES	107
6.1	Construcción	108
6.2	Experimento	109



## Índice de figuras

Figura 01: Ciclo del Nitrógeno.....	11
Figura 02: Ciclo del Carbono .....	13
Figura 03: Esquema Ciclo Aerobio.....	14
Figura 04: Esquema Ciclo Anaerobio.....	15
Figura 05: Esquema Fases Digestión Anaerobia .....	18
Figura 06: Digestor UASB.....	35
Figura 07: Digestor de filtro anaerobio .....	36
Figura 08: Digestor de película fija.....	37
Figura 09: Digestor de lecho expandido.....	38
Figura 10: Digestor cubierta fija .....	39
Figura 11: Digestor de cúpula flotante .....	42
Figura 12: Digestor tipo hindú .....	42
Figura 13: Digestor esférico .....	44
Figura 14: Digestor tubular .....	44
Figura 15: Curvas DBO.....	51
Figura 16: Instalación completa .....	52
Figura 17: Soporte .....	53
Figura 18: Detalle 1 soporte.....	54
Figura 19: Detalle 2 soporte.....	54
Figura 20: Biodigestor.....	55
Figura 21: Detalle 1 Biodigestor.....	56
Figura 22: Detalle 2 Biodigestor .....	56
Figura 23: Boquilla salida.....	57
Figura 24: baño térmico .....	58
Figura 25: Agitador .....	58
Figura 26: Detalle Agitador .....	59
Figura 27: Tapa biodigestor .....	60
Figura 28: Tapa biodigestor instalada .....	61
Figura 29: Bidón .....	62
Figura 30: Detalle manómetro.....	62
Figura 31: Eliminador de CO <sub>2</sub> .....	63
Figura 32: Sistema Completo.....	64
Figura 33: Gasómetro y calorímetro.....	65
Figura 34: ORSAT .....	66
Figura 35: Campana .....	67
Figura 36: Hornos .....	67
Figura 37: Pesa .....	68
Figura 38: Campana enfriamiento.....	68
Figura 39: pH-metro.....	69
Figura 40: Incubadora.....	69
Figura 41: Fotómetro .....	70
Figura 42: Variación pH/T <sup>a</sup> Ex1 .....	82
Figura 43: Variación pH/T <sup>a</sup> Ex2.....	82
Figura 44: Variación pH/T <sup>a</sup> Ex3.....	83
Figura 45: Variación pH/T <sup>a</sup> Ex4.....	83
Figura 46: Variación pH/T <sup>a</sup> todos los experimentos.....	85
Figura 47: Tubos para almacenamiento de biogás. ....	90
Figura 48: Operaciones con el gasómetro. ....	90
Figura 49: Variación pH/V Ex1 .....	95
Figura 50: Variación pH/V Ex2.....	95
Figura 51: Variación pH/V Ex3.....	96





Figura 52: Variación pH/V Ex4.....	96
Figura 53: Valores medios de volumen específico del gas producido .....	97
Figura 54: Relación pH/Volumen gas producido .....	98
Figura 55: Composición biogás.....	101
Figura 56: Alternativa al calorímetro de Junkers con gasómetro de campana flotante .....	103
Figura 57: Relación pH/Volumen gas producido .....	110
Figura 58: Valores medios de volumen específico del gas producido .....	111
Figura 59: Composición biogás.....	113

## Índice de tablas

Tabla 01: Tabla factores determinantes procesos aerobio y anaerobio .....	16
Tabla 02: Rangos Óptimos proceso Anaerobio.....	27
Tabla 03: Parámetros operacionales proceso Anaerobio .....	28
Tabla 04: Productos tratamientos Aerobio y Anaerobio .....	30
Tabla 05: Comparativa tecnologías digestión anaerobia .....	46
Tabla 06: Parámetros de control .....	71
Tabla 07: Valores típicos ST .....	72
Tabla 08: Contenido sólidos.....	74
Tabla 09: TRH recomendados .....	76
Tabla 10, 11, 12 y 13: Tablas pH Experimentos 1, 2, 3 y 4 .....	81
Tabla 14: Valores pH obtenidos.....	84
Tabla 15: DQO eficiencia remoción .....	86
Tabla 16: Eficiencias de remoción promedio DQO.....	87
Tabla 17: Eficiencia remoción P y N .....	89
Tabla 18, 19, 20 y 21: Tablas V específico Experimentos 1, 2, 3 y 4 .....	94
Tabla 22: Resumen Valores Volumen específico gas producido.....	97
Tabla 23: Composición biogás.....	101
Tabla 24: Valores temperaturas calorimetría .....	105
Tabla 25: Poder calorífico biogás.....	105
Tabla 26: Resultados finales T <sup>a</sup> - Volumen biogás producido .....	109
Tabla 27: Resultados finales pH- Volumen biogás producido .....	111
Tabla 28: Resultados finales remoción DQO, P y N.....	112
Tabla 29: Resumen promedios biogás producido .....	112
Tabla 30: Composición promedio del biogás .....	114



## INTRODUCCIÓN GENERAL A LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

### 1.1 Conceptos básicos digestión anaerobia

#### 1.1.1 Ciclos de la materia orgánica: aerobio y anaerobio

Los seres vivos y la materia orgánica están formados básicamente por oxígeno, nitrógeno, carbono e hidrógeno y pequeñas cantidades de otros elementos como fósforo, azufre, calcio y potasio, entre muchos otros. Estos elementos se encuentran también en la naturaleza no viva, acumulados en la atmósfera (oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono fundamentalmente), en el suelo (agua, nitratos, fosfatos y otras sales) o en las rocas (fosfatos, carbonatos, etc.)

Todos los elementos sufren transformaciones en la tierra a partir de las interacciones con el suelo, los animales, las plantas y los microorganismos, siguiendo ciclos cerrados. Se cumple así la ley de conservación de la masa. Estos ciclos mantienen una estrecha relación con el flujo de energía en el ecosistema, de modo que la energía que utilizan los organismos es la que se encuentra en los enlaces químicos que unen los elementos para formar las moléculas.

Encontramos dos claros ejemplos de estos ciclos en los ciclos del nitrógeno y el carbono, que se exponen brevemente a continuación:

- Ciclo del nitrógeno:

El nitrógeno es un elemento básico para los organismos, que lo emplean en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN) y otras moléculas fundamentales del metabolismo.

La reserva fundamental del nitrógeno es la atmósfera, en donde se encuentra en forma de nitrógeno molecular elemental ( $N_2$ ), aunque esta molécula no puede ser absorbida directamente por la mayoría de organismos.

Son las bacterias y las algas cianofíceas las que realizan el proceso de fijación del nitrógeno, es decir, que convierten el  $N_2$  en otras formas químicas, como nitratos y amonio, asimilables por las plantas. El amonio ( $NH_4^+$ ) y el nitrato ( $NO_3^-$ ) lo toman las plantas por las raíces y lo usan en su metabolismo para la síntesis de las proteínas y ácidos nucleicos. Los animales obtienen su nitrógeno al comer plantas o a otros animales.

Los animales transforman los compuestos nitrogenados en ión amonio, altamente tóxico y que debe eliminarse. Esta eliminación se realiza en forma de amoniaco (algunos peces y organismos acuáticos), en forma de urea (el hombre y otros mamíferos) o en forma de ácido úrico (aves y otros animales de zonas secas). Estos compuestos van a la tierra o al agua de donde pueden ser tomados de nuevo por las plantas o bien ser usados por algunas bacterias.

Unas bacterias convierten el amoniaco en nitrito y otras transforman este nitrito en nitrato. Cuando existe un exceso de materia orgánica en el mantillo (capa superior del suelo, formada por la descomposición de materias orgánicas), en condiciones anaerobias, hay otras bacterias que producen desnitrificación, convirtiendo los compuestos de N en  $N_2$ , lo que hace que se pierda de nuevo nitrógeno del ecosistema a la atmósfera.

A continuación se muestra un esquema del ciclo del nitrógeno:

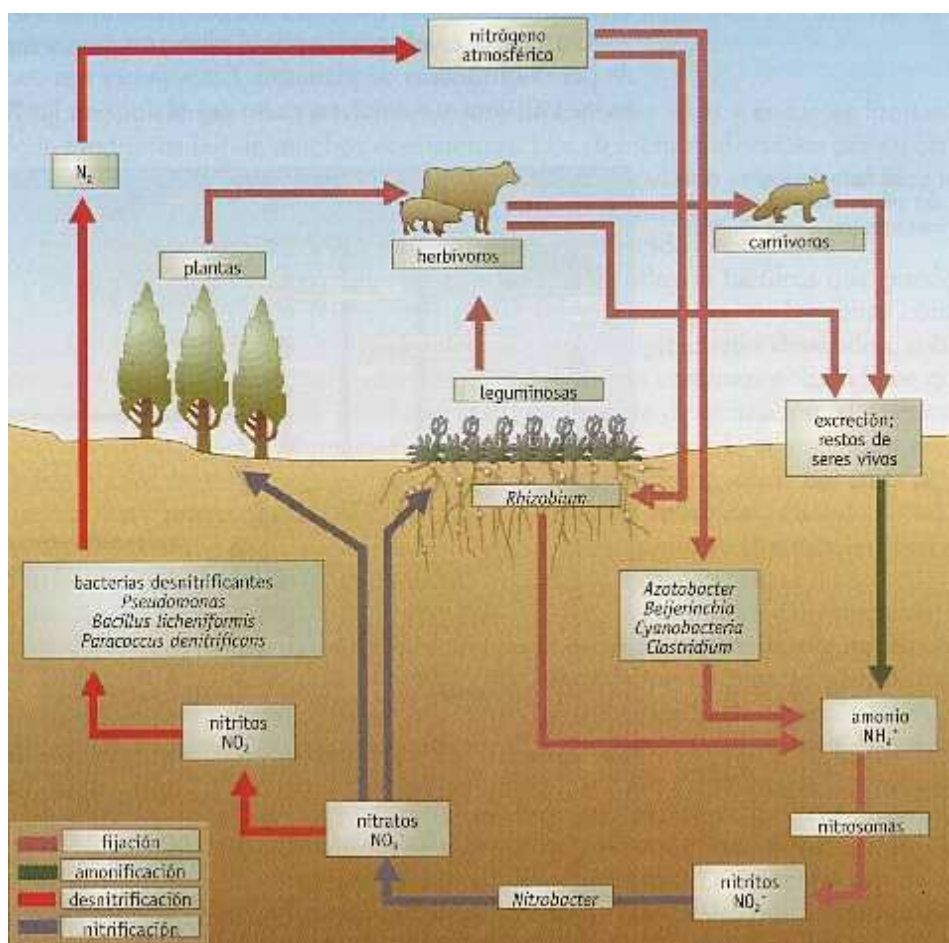


Figura 1: Ciclo del Nitrógeno

- Ciclo corto del carbono:

En este caso nos estamos refiriendo al el ciclo corto del carbono o ciclo bioquímico, ya que existe un ciclo largo o geoquímico, que involucra la disolución del  $\text{CO}_2$  en el agua, su precipitación como carbonatos y su transformación por metamorfismo geológico en silicatos y el consecuente desprendimiento de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, pero éste último no presenta relación con el tema a tratar.

El carbono es elemento básico en los seres vivos, pues todas las moléculas orgánicas están formadas por cadenas de carbonos enlazados entre sí (carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos).

La reserva fundamental de carbono se basa en moléculas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se encuentran en la atmósfera y la hidrosfera. Este gas está en la atmósfera en una concentración de más del 0,03% y cada año aproximadamente un 5% de estas reservas de  $\text{CO}_2$  se consumen en los procesos de fotosíntesis (las plantas asimilan el carbono atmosférico a partir de la energía solar y lo convierten en tejido celular), es decir, que todo el anhídrido carbónico se renueva en la atmósfera cada 20 años.

La vuelta de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera se realiza cuando, mediante la respiración, los seres vivos oxidan los alimentos produciendo  $\text{CO}_2$ . En el conjunto de la biosfera la mayor parte de la respiración la realizan las raíces de las plantas y los organismos del suelo.

El petróleo, carbón y materia orgánica acumulados en el suelo son resultado de épocas en las que se ha devuelto menos  $\text{CO}_2$  a la atmósfera del que se tomaba. De este modo apareció el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) en la atmósfera. Por ello, si hoy consumiéramos todos los combustibles fósiles almacenados, el  $\text{O}_2$  desaparecería de la atmósfera. El ritmo creciente al que estamos devolviendo  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, mediante el consumo de las energías fósiles por la actividad humana, es motivo de preocupación puesto que se acumula una mayor concentración de gases de efecto invernadero, con el consiguiente cambio climático asociado.

A continuación se muestra un esquema del ciclo del carbono:

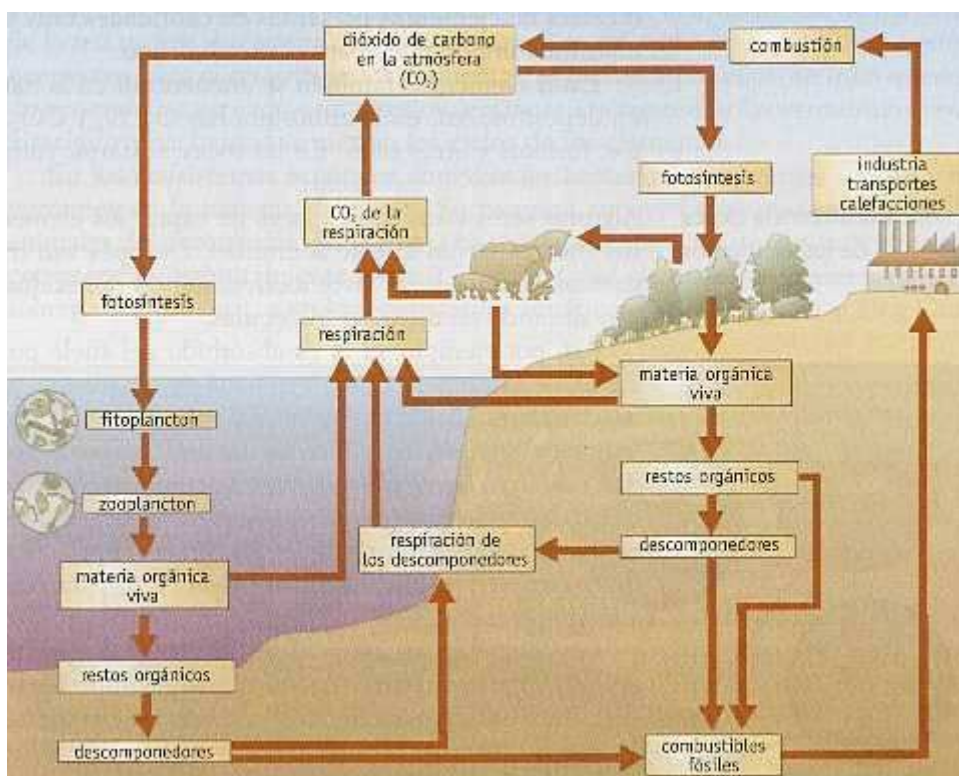


Figura 2: Ciclo del Carbono

### Ciclos aerobio y anaerobio

A parte de los ciclos de los elementos, existen ciclos más globales, como el ciclo de la materia orgánica, que puede ser de dos tipos: el ciclo aerobio y el ciclo anaerobio.

El ciclo aerobio es llevado a cabo por microorganismos que precisan de oxígeno atmosférico o disuelto en el agua. La materia orgánica es fermentada a partir de un aporte energético, dando lugar a una reacción exotérmica. Se obtienen como productos finales  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

El ciclo anaerobio se desarrolla en ausencia de oxígeno molecular y precisa menor aportación energética, pero requiere mayor tiempo de reacción. La degradación de la materia orgánica es progresiva hasta llegar a obtener como productos finales  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . En nuestro caso, nos centramos en ciclo degradativo de la materia orgánica por organismos unicelulares, pues existe un ciclo aerobio de organismos pluricelulares.

Estos ciclos se muestran en las siguientes figuras. Los elementos como el nitrógeno y el azufre aparecen como partes integrantes de los ciclos. Estos dos elementos son importantes en la síntesis y descomposición de la materia orgánica, aunque no son los únicos, y se podrían indicar otros elementos y ciclos bioquímicos.

La denominación de aerobio y anaerobio se aplica únicamente a la parte derecha de las figuras, que es la parte de descomposición de la materia orgánica muerta. Es en esta parte en donde aparecen los productos iniciales e intermedios, antes de que se produzcan los productos estabilizados finales. La parte izquierda del ciclo es igual en ambos sistemas. Esta parte comprende la formación o síntesis de la materia orgánica necesaria para la vida animal o vegetal.

En los sistemas aerobios, los productos finales de degradación se oxidan más y por lo tanto quedan a un nivel energético menor que los productos de la digestión anaerobia. Esto explica el hecho que se precise mucha más energía en la degradación aerobia que en la anaerobia.

Por otro lado la degradación anaerobia es un proceso mucho más lento desde un punto de vista cinético.

La porción del ciclo que corresponde a la descomposición (lado derecho de las figuras) es la que debemos controlar para llevar a cabo los tratamientos de la materia orgánica. El proceso biológico consiste en controlar el medio requerido para el crecimiento óptimo de los microorganismos, independientemente del residuo a tratar.

- Ciclo aerobio:

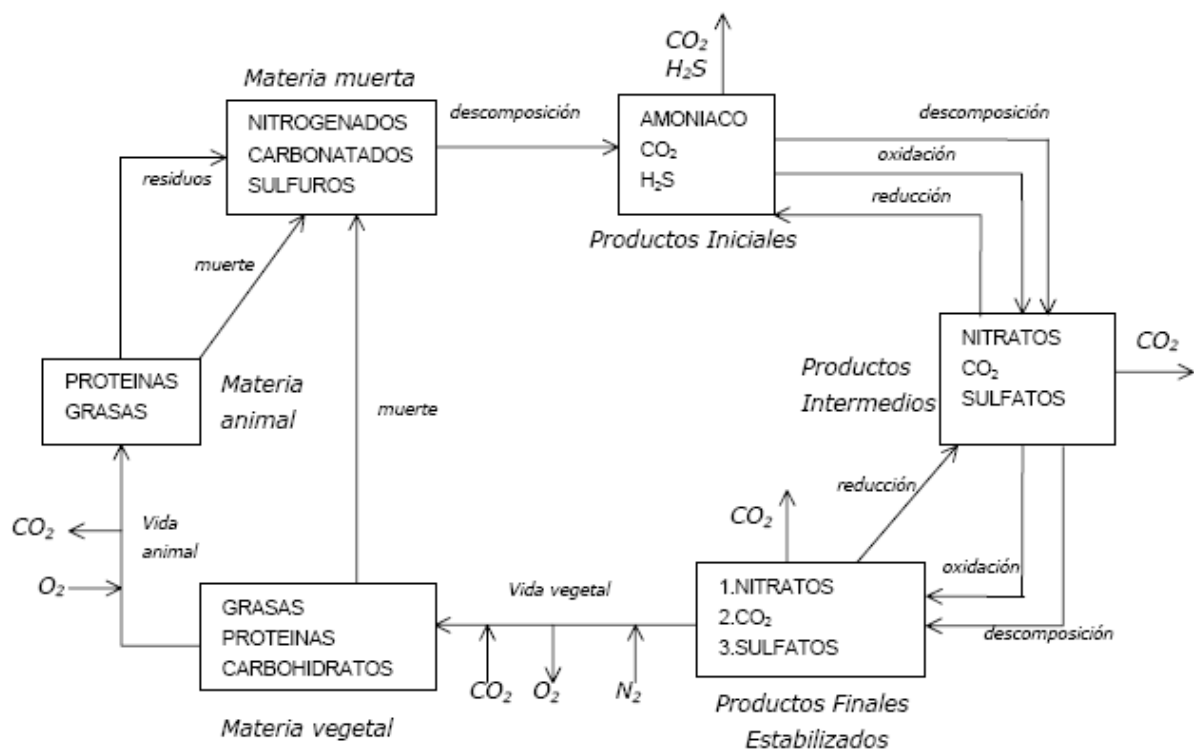


Figura 3: Esquema Ciclo Aerobio



- Ciclo anaerobio:

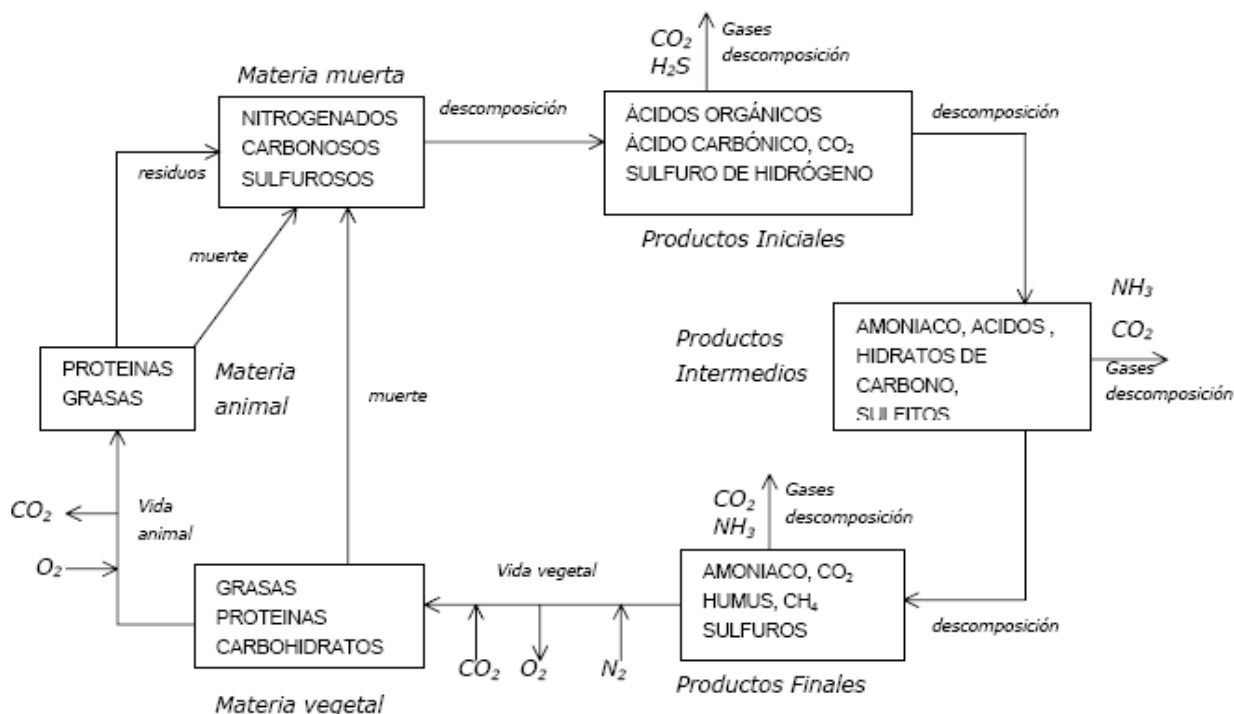


Figura 4: Esquema Ciclo Anaerobio

Cuando queremos gestionar o tratar un residuo orgánico podremos optar por las dos vías básicas de tratamiento: aerobio o anaerobio. Siendo procesos distintos es preciso conocer un poco las características básicas de estos tratamientos de forma comparativa. Se sintetizan las principales en la siguiente tabla:

FACTOR	TRATAMIENTO AEROBIO	TRATAMIENTO ANAEROBIO
Proceso de fermentación	Degradación de la materia orgánica a $CO_2$ , $H_2O$ , nitratos, sulfatos, fosfatos y biomasa. En presencia de oxígeno molecular.	Degradación paso a paso de la materia orgánica a $CO_2$ , $NH_4$ , metano y biomasa, eventualmente $H_2S$ . Sin la presencia de oxígeno molecular.
Crecimiento microorganismos	Crecimiento muy rápido, poco tiempo de generación, gran producción de biomasa (fango)	Crecimiento lento (metanogénicas), elevado tiempo de generación, poca producción de biomasa (fango)
Condiciones ambientales microorganismos	Mucha diversidad de especies, con un amplio espectro de degradación, bajo nivel de especialización, baja sensibilidad	Mayor número de grupos de organismos, con condiciones ambientales contrarias, más sensibles a cambios



		ambientales
Operatividad	Mayor estabilidad biológica que proceso anaerobio, lo que conlleva un menor control del proceso.	Biología más conflictiva que proceso aerobio. Necesidad de control del proceso por tratarse de un sistema estanco
Demanda energética	O <sub>2</sub> necesario como receptor de hidrógeno, mayor demanda energética para aireación	No precisa O <sub>2</sub> como aceptador de hidrógeno, menor demanda energética (no aireación)
Ganancias energéticas	Diferencia sensible de nivel energético entre sustrato inicial y producto final, capacidad de auto-calefacción por reacción exotérmica, productos finales sin aplicación energética	Diferencia energética entre sustrato inicial y producto final baja. Nada o muy poca capacidad de auto-calefacción, productos finales con recuperación energética (metano)
Necesidad de nutrientes (N, P)	Mayor	Menor
Calidad del sólido digerido	Menor estabilización por un proceso menor de digestión.	Mayor estabilización debido a una mayor digestión de la materia orgánica.
Productos obtenidos	Fertilizante orgánico sólido o compost	Fertilizante orgánico líquido y sólido, biogás como combustible
Necesidad de calefacción	Al tratarse de una reacción exotérmica, no precisa de calefacción y puede llevarse a cabo en rangos amplios de temperatura	Precisa de calefacción en climas con mínimas anuales inferiores a los 15°C
Problemas de olores	Aun tratarse de un sistema abierto, los compuestos no generan problemas de malos olores	Problemas de malos olores debido a la producción de H <sub>2</sub> S y mercaptanos

Tabla 1: Tabla factores determinantes procesos aerobio y anaerobio



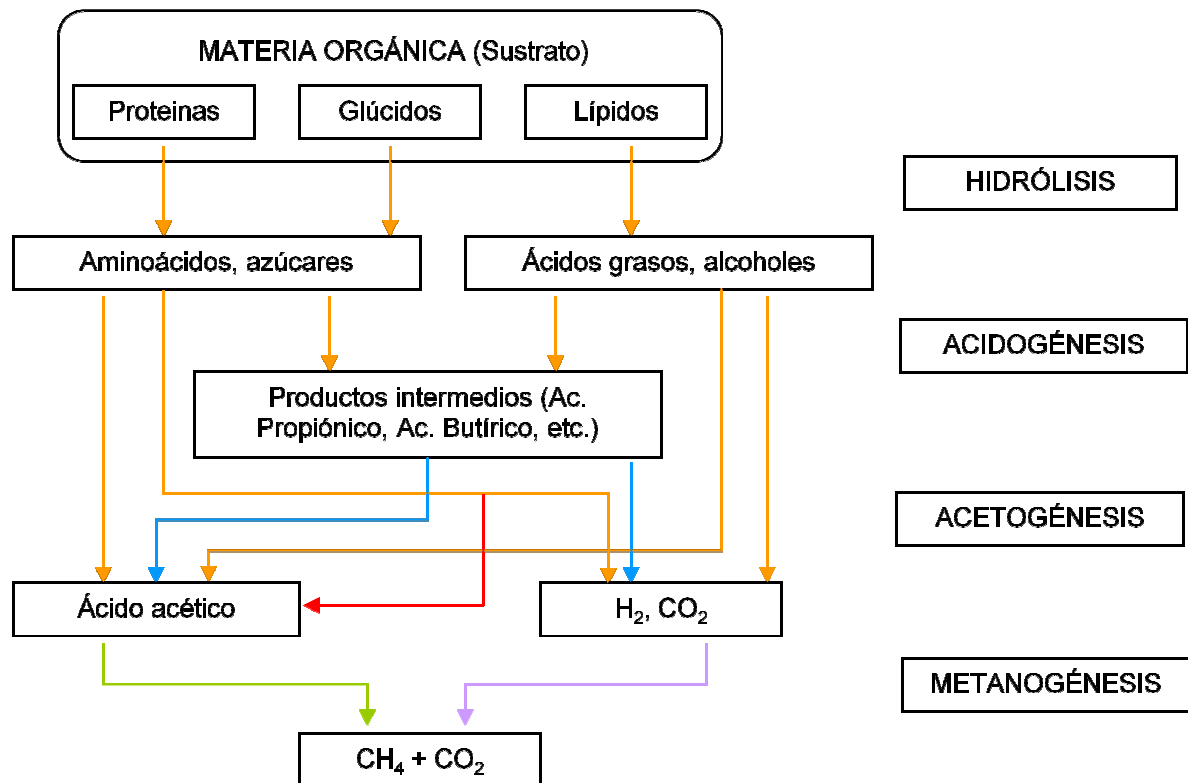
Los sistemas anaerobios que funcionan correctamente comportan en muchos casos los beneficios siguientes:

- Producción de energía (calor, luz, electricidad)
- Transformación de la materia orgánica en fertilizantes orgánicos de alta calidad
- Incremento de las condiciones higiénicas debido a la reducción de patógenos, huevos de lombriz y moscas
- Ventajas ambientales como la protección del suelo, el agua, el aire y la vegetación leñosa
- Beneficios micro-económicos por el autoabastecimiento de fertilizante y energía
- Beneficios macro-económicos por la descentralización de la energía, la sustitución de importaciones y la protección del medio ambiente

La tecnología del biogás puede contribuir sustancialmente a la conservación y desarrollo si las condiciones son favorables. Aún así, la gran inversión inicial que se requiere deberá de considerarse.

#### 1.1.2 Proceso bacteriológico de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es el resultado de la interacción de distintos grupos de bacterias, que actúan de forma simbiótica. Se caracteriza por la existencia de tres fases diferenciadas del proceso de degradación del sustrato: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, interviniendo distintas poblaciones bacterianas, tal y como se muestra en la siguiente figura:



1. Bacterias hidrolíticas-acidogénicas
2. Bacterias acetogénicas
3. Bacterias homoacetogénicas
4. Bacterias metanogénicas hidrogenófilas
5. Bacterias metanogénicas acetoclásticas

Figura 5: Esquema Fases Digestión Anaerobia

Los procesos representados son los siguientes:

- **Hidrólisis:** La materia orgánica es metabolizada por los microorganismos, que descomponen las cadenas largas de materia orgánica en otras más cortas, obteniendo los productos intermedios.
- **Acidogénesis y Acetogénesis:** En esta fase se convierten los productos intermedios en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

Estas dos fases las llevan a cabo un grupo de bacterias denominadas hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan y fermentan las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples (acético mayormente), siendo este proceso el origen del oxígeno. Son bacterias anaerobias facultativas (significa que pueden consumir oxígeno molecular para su metabolismo, se pueden adaptar a la presencia de oxígeno) y estrictas (no crecen en presencia de oxígeno molecular, el oxígeno resulta tóxico para ellas en mínimas cantidades). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaerobio ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas siendo el crecimiento bacteriano en esta etapa rápido.

En esta primera etapa no habrá prácticamente reducción de la DQO del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente. Hay una pequeña disminución de la DQO por el fenómeno de respiración bacteriana, transformación de materia orgánica en metabolitos más simples y formación de  $\text{CO}_2$  (entre otras moléculas simples) para la obtención de energía por parte de la célula para su actividad (aproximadamente el 5% de la energía total almacenada en los enlaces de la materia orgánica).

- **Metanogénesis:** el segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono en esta fase. Se trata de bacterias estrictamente anaerobias, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Se denominan bacterias metanogénicas, y las más importantes son las que transforman los ácidos propanoico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica.

Las tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas son cinco veces menores que las de la fase anterior y por ello serán las que limitarán el proceso de degradación anaerobia. Serán también las que condicionarán el tiempo de retención del reactor durante la fase de diseño, así como la temperatura de trabajo. Por tanto, al ser la etapa más lenta, será la que controle la velocidad total del proceso.

Los grupos de bacterias descritos se encuentran de forma simbiótica. Las productoras de ácido o acidogénicas crean la atmósfera ideal para el desarrollo de las bacterias metanogénicas (condiciones anaerobias y cadenas orgánicas cortas). Las metanogénicas a su vez usan los productos intermedios de las acidogénicas, que sino fueran consumidos crearían condiciones tóxicas para las acidogénicas (disminución del pH). Por tanto, es el grupo de bacterias en conjunto el que produce la fermentación anaerobia, sin ser posible que ninguna de ellas independientemente lleve a cabo todo el proceso.

La naturaleza y composición química del sustrato, así como los factores ambientales, condicionan la composición cualitativa de la población bacteriana existente en cada etapa. Se altera asimismo la velocidad de reacción y la calidad del efluente.

Como resultado de la actividad de las bacterias anaerobias se obtiene un efluente estabilizado (cuya materia orgánica está en formas moleculares sencillas, sin posibilidad de volver a transformarse en otras moléculas en condiciones ambientales sin la participación de organismos autótrofos (aquellos que mediante fotosíntesis o quimiosíntesis pueden producir biomoléculas) y el biogás. El efluente se puede aplicar como fertilizante, puesto que los nutrientes no son eliminados, en forma de gases, por las bacterias de la digestión anaerobia, consiguiendo así como producto un fertilizante orgánico de calidad variable en función del sustrato tratado.

El biogás está formado, dependiendo en gran parte del sustrato, por un 40-70% de metano; 30-60% de  $\text{CO}_2$  y pequeñas cantidades de otros gases, como ácido sulfhídrico. Tiene un poder calorífico aproximado de  $5.500 \text{ kcal/m}^3$ . El factor de conversión de la DQO a metano será de  $0,25 \text{ kg CH}_4/\text{kg DQO}$  (que equivale a  $0,38 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$  a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$  y presión de una atmósfera). En energía primaria sería de  $3,5 \text{ kWh/Kg DQO}$  eliminada, hecho que representa una gran ventaja frente sistemas aerobios que requieren  $1 \text{ kWh/kg O}_2$  consumido.

### 1.1.3 Parámetros ambientales

Las bacterias, como seres vivos, se ven afectadas por las condiciones ambientales del entorno. Las bacterias metanogénicas serán las que determinen los rangos adecuados para el proceso de digestión, debido a su lento crecimiento y su alta sensibilidad a la variación de los parámetros. A continuación se caracterizan los parámetros ambientales que afectan a la biodigestión:

#### 1) pH:

##### - Características

Representa la acidez o basicidad del medio. Depende en gran parte del equilibrio del carbono inorgánico (dióxido de carbono /bicarbonato/ ácido carbónico), que define la capacidad tampón (de autorregular el pH) del afluente. Esta capacidad se mide a partir de la alcalinidad. Se considera que unos valores de alcalinidad de  $2000\text{-}3000 \text{ ppm}$  son suficientes. Si no se cumple se deberá de plantear la posibilidad de regular exteriormente el pH. Está muy relacionado también con la presencia de ácidos grasos volátiles (AGV), que son los que se forman en la fases de acidogénesis y que si se acumulan inhiben las bacterias metanogénicas por el descenso del valor de pH. Nunca la concentración de éstos deberá ser superior a  $250 \text{ ppm}$ .

Las bacterias se desarrollan favorablemente en entornos neutros o ligeramente alcalinos. Dependerá también del equilibrio del sistema amonio-amoniaco, así que raramente se tomará este como indicador del potencial de producción de biogás o como medida de los ácidos presentes en el sustrato. Un digestor con alta concentración de ácidos grasos volátiles precisará de alguna sustancia que incremente el valor del pH, que no deberá caer por debajo de 6,2 puesto que crea un medio tóxico para las bacterias metanogénicas e inhibe el proceso.

- Influencia en el proceso de digestión

Aumento del pH:

- Inhibición del proceso biológico
- Aumenta rápidamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye rápidamente
- El pH aumenta rápidamente.

Reducción del pH:

- Inhibición del proceso biológico
- Aumenta rápidamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye rápidamente
- El pH se reduce rápidamente.

## **2) Nutrientes:**

- Características

La presencia de nutrientes como nitrógeno y fósforo, es necesaria, y en una adecuada proporción con el carbono para el correcto desarrollo de la flora bacteriana.

Cuando las cantidades de nitrógeno son muy elevadas pueden existir problemas de inhibición por formación de amonio, sobre todo con pH de trabajo altos.

Otros tipos de nutrientes serán necesarios en pequeñas cantidades, como sulfuro, potasio, calcio, magnesio y otros elementos traza como el hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, etc. Los sustratos normalmente contienen una cantidad suficiente de estos elementos. Altas concentraciones de estos elementos producen efectos inhibidores sobre el proceso, así que se deberá realizar un análisis químico del sustrato cuando las concentraciones de alguno de estos elementos sean altas.



- Influencia en el proceso de digestión

Relación inadecuada:

- Valores muy inferiores disminuyen la velocidad de reacción y valores superiores crean problemas de inhibición del proceso biológico.

Amonio en el afluente:

- Inhibición del proceso biológico
- Aumenta rápidamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye rápidamente
- El pH se reduce moderadamente.

Nitrógeno orgánico en el afluente:

- Inhibición del proceso biológico
- Aumenta moderadamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye moderadamente
- El pH se reduce lentamente

### 3) Temperatura:

- Características

La digestión anaerobia es posible entre los 3 y los 70 °C.

Existen tres rangos de trabajo por los dos tipos de degradaciones bacterianas existentes:

- a) Zona psicrófila: por debajo de 20 °C
- b) Zona mesofílica: entre 20 y 40 °C
- c) Zona termofílica: por encima de los 40 °C

Con el aumento de las temperaturas se acelera el crecimiento de las bacterias y con esto la velocidad de producción del biogás. Trabajando en el rango termofílico se asegura además la higienización del sustrato digerido, puesto que se destruyen patógenos, se esterilizan las semillas y se eliminan las larvas y huevos de insectos, debido a la alta temperatura. Un aumento de la temperatura de digestión tiene el mismo efecto que un aumento del tiempo de retención del sustrato, por lo que mayor temperatura implicará un menor volumen del reactor. Tienen pues grandes ventajas pero requieren un mayor control y seguimiento, puesto que a altas temperaturas el nitrógeno amoniacal libre se convierte en inhibidor si éste está presente en gran cantidad en el sustrato, como sería el caso de las excretas de animales. Este factor puede eliminarse con la mezcla de residuos de diferentes orígenes.

En general la digestión anaerobia en plantas sin calefacción, será posible de forma satisfactoria cuando la media de la temperatura anual esté por encima de los 20 °C, o donde la media diaria sea mínimo de 18 °C. En el rango de 20-28 °C la producción de gas se incrementa más que proporcionalmente.

Si la temperatura del interior del digestor está por debajo de los 15 °C, la producción de gas será tan baja que la planta no será económicamente factible si este es el objetivo principal de construcción de la misma.

- Influencia en el proceso de digestión

Variación de temperatura:

- Se desequilibran las tres etapas del proceso biológico
- Aumenta rápidamente la concentración de AGV
- La producción de gas disminuye rápidamente
- El pH se reduce rápidamente.

El grado de sensibilidad del proceso depende del rango de trabajo del biodigestor. Las siguientes variaciones en función del rango de temperatura de trabajo no son todavía inhibitorias del proceso.

- Rango psicrófilico:  $\pm 2$  °C/hora

- Rango mesofílico:  $\pm 1$  °C/hora

- Rango termofílico:  $\pm 0,5$  °C/hora

La fluctuación diurna-nocturna de la temperatura no será un problema grave en plantas que estén construidas bajo suelo, puesto que la temperatura del suelo a un metro de profundidad es prácticamente constante.

#### 4) Tóxicos:

##### - Características

Son sustancias que a partir de una cierta concentración inhiben la actividad de las bacterias, reduciendo la velocidad de reacción, y llegan a interrumpir la digestión en concentraciones mayores. Aún así, puede existir una cierta aclimatación por parte de las bacterias a una cierta concentración de sustancias tóxicas.

Estas pueden ser:

- Oxígeno: para las bacterias anaerobias estrictas el  $O_2$  es un tóxico. En el caso de las bacterias facultativas, éstas dejan de actuar por vía anaerobia y lo hacen por vía aerobia, puesto que desde el punto de vista de eficiencia energética y asimilación de materia orgánica les resulta más beneficioso.
- Metales: cobre (inhibidor a partir de 40 ppm, tóxico en 70 ppm); plomo; plata; cromo (500 ppm); arsénico; boro; zinc inhibidor en 400 ppm y tóxico en 600 ppm; níquel inhibidor a partir de 100 ppm, tóxico a 1000 ppm.
- Calcio estimulante 100-200 ppm, inhibidor 2500-4500 ppm, tóxico 8000 ppm; Magnesio estimulante 75-150 ppm, inhibidor 1000-1500 ppm, tóxico 3000 ppm; Potasio estimulante 200-400 ppm, inhibidor 2500-4500 ppm, tóxico 12000 ppm; Sodio estimulante 100-200 ppm, inhibidor 3500-5500 ppm, tóxico 8000 ppm.
- Amonio: beneficioso de 50-200 ppm; ningún efecto adverso de 200-1000 ppm; inhibidor para altos valores de pH 1500-3000 ppm, tóxico por encima de 3000 ppm. Las bacterias metanogénicas pueden adaptarse a concentraciones de 5000-7000 ppm de nitrógeno amoniacal, pero la concentración de amonio no debe exceder de 200-300 ppm. El equilibrio amonio-amoniaco depende de la temperatura y del pH.
- Cianuros (tóxico a 2 ppm), sulfatos, cromatos o fluoruros.
- Formas no ionizadas de ácidos grasos volátiles y ácido sulfhídrico son inhibidores reversibles





Para los residuos ganaderos serán críticos el nitrógeno amoniacal (200-700ppm), los antibióticos y los desinfectantes

- Influencia en el proceso de digestión

Sustancias tóxicas en el influente:

- Inhibición del proceso biológico
- Aumenta rápidamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye rápidamente
- El pH se reduce moderadamente.

Sulfato en el afluente:

- Inhibición del proceso biológico
- Aumenta rápidamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye rápidamente
- El pH se reduce moderadamente.

## 5) Sólidos totales:

- Características

La cantidad de sólidos de entrada está asociada a la humedad del afluente. Así un valor del 10% de ST significa una humedad de la corriente del 90%. Se requiere un menor volumen del reactor cuanto mayor sea el contenido en sólidos y menor sea la cantidad de agua. En función del diseño del reactor, tenemos tres tipos de digestores:

- Bajo contenido en sólidos: 10%
- Contenido medio en sólidos: 15-20%



- Alto contenido en sólidos: 22-40%
- Influencia en el proceso de digestión

Aumento de la media de sólidos en suspensión del efluente:

- Hay un lavado de las bacterias (salen del reactor con la corriente de salida)
- Aumenta lentamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye lentamente

#### **6) Tiempo de retención:**

- Características

El tiempo de retención representa el tiempo que un residuo está dentro del digestor, el tiempo de residencia hidráulica de la corriente residual. Depende del diseño del reactor en cuanto a temperatura de trabajo y mezclado del contenido, así como de la tecnología del mismo.

El volumen del digestor depende del caudal de residuos que se tratan y de las condiciones ambientales (sobre todo de la temperatura). Tenemos pues que una corriente líquida precisará de mayor volumen, por un mismo tiempo de retención. Tendremos también que con el aumento de la temperatura (introduciendo calefacción), habrá una disminución del tiempo de retención.

Una vez diseñado el volumen del reactor, para asegurar un determinado tiempo de retención del afluente, será necesario que no se introduzcan cargas inorgánicas en el interior del digestor, puesto que estas se acumularían en el reactor, disminuyendo el volumen efectivo de este y en consecuencia el tiempo de retención.

- Influencia en el proceso de digestión

Aumento de la entrada de sólidos inorgánicos suspendidos:

- Hay un lavado de las bacterias (salen del reactor con la corriente de salida)
- Aumenta lentamente la presencia de AGV
- La producción de gas disminuye lentamente.

## 7) DQO y DBO:

### - Características

La demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) son parámetros que representan indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente (DQO) o biológicamente (DBO) la materia orgánica.

La carga orgánica introducida en un digestor es la cantidad máxima asimilable que tiene el digestor, medido en kg DBO o SV / m<sup>3</sup> de digestor. Los sólidos volátiles (SV) representan la materia orgánica de la muestra, medida como el contenido sólido menos el contenido de cenizas resultantes de la combustión completa. A continuación podemos ver un esquema del cálculo de sólidos, que comentaremos en profundidad posteriormente:



$$\%ST = 100 \cdot (W_{m.seca} - W_{tara}) / (W_{muestra} - W_{tara})$$

$$\%MO = 100 \cdot (W_{m.calc.} - W_{tara}) / (W_{muestra} - W_{tara})$$

### - Influencia en el proceso de digestión

Aumento de la carga con materia orgánica disuelta:

- Se desequilibran las tres etapas
- Aumenta rápidamente la presencia de AGV
- La producción de gas incrementa rápidamente
- El pH se reduce rápidamente.

Aumento de la carga con materia orgánica en suspensión:

- Se desequilibran las tres etapas y hay un efecto de lavado de las bacterias (salen del reactor con la corriente de salida)
- Aumenta moderadamente la presencia de AGV
- La producción de gas incrementa moderadamente.

A continuación se presenta una tabla resumen de todos los parámetros junto a sus rangos óptimos y observaciones:

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO	OBSERVACIONES
pH	6,6-7,6	Nunca inferior a 6,2
Nutrientes	C/N/P = 150/5/1	C/N = 15/1 – 45/1
Temperatura	15 – 70°C	Tres rangos existentes
Tóxicos	En función del grupo	Reversibles e irreversibles
Sólidos totales	10 – 40%	Depende del tipo de digestor
Tiempo de retención	2 horas – 100 días	Función del diseño
DBO/DQO	Función del diseño	Es la materia orgánica

Tabla 2: Rangos Óptimos proceso Anaerobio

#### 1.1.4 Parámetros de control

Para poder controlar las posibles inhibiciones del proceso, lo mejor es estudiar la variación de ciertos parámetros de control operacional, que nos permitan determinar la causa de la alteración en caso de anomalías en el funcionamiento. Esto significa controlar algunos de los factores ambientales, sobre todo aquellos que nos sean más accesibles, y desarrollar una rutina de control de la instalación.

La siguiente tabla es un ejemplo de posibles parámetros de control, en la que se proponen valores que pueden causar inhibiciones o alteraciones en el proceso, así como los rangos aceptables de variación de los mismos.

<b>Parámetros operacionales de los procesos anaerobios</b>		
<i>Medida</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Intervalo de variación aceptable</i>
<b>Monitoreo del proceso</b>		
Temperatura	Mantenerla constante	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Carga de entrada (kg DQO/d)	Prevención de las saturaciones	+50% para DQO disuelta +100% para DQO suspendida
<b>Control del proceso</b>		
Concentración de los ácidos volátiles	Detección de posibles inestabilidades del proceso	Total: 200-500g como AAc/m <sup>3</sup> AAc: 200-500g como AAc/m <sup>3</sup> APr: 50-100g como AAc/m <sup>3</sup>
Producción de gas	Control de las bacterias metanogénicas	$\pm 20\%/día$ (en función de la carga orgánica de entrada)
pH	Control de la inestabilidad	6-7. Variación $\pm 5\%/día$
<b>Control del funcionamiento</b>		
Concentración de materia orgánica en el afluente	Control de la eficiencia del tratamiento	Variación $\pm 10\%/día$
Producción de gas / calidad	Control de la media producida de metano	Variación $\pm 20\%/día$ Contenido de metano 60-75%
Calidad del lodo digerido (% de volátiles)	Control del funcionamiento de la estabilización de la materia orgánica	60-70% normal, variación $\pm 5\%$

Tabla 3: Parámetros operacionales proceso Anaerobio

## 1.2 Corrientes residuales a tratar

Cualquier tipo de sustancia orgánica con un contenido suficiente de humedad es adecuada para tratar mediante digestión anaerobia, es decir, puede fermentar o ser digerida. Aún así, sólo deberán considerarse los sustratos homogéneos para las plantas de diseño más simple: estiércol y orina de cerdos, ganado, aves de corral y aguas residuales de sanitarios. Residuos y aguas residuales de las industrias también serán adecuados para plantas simples si son homogéneos y en estado líquido.

La producción específica de gas ( $\text{m}^3$  de gas/ masa o volumen de sustrato alimentado) dependerá del tipo de alimentación que se introduzca en el reactor y de la tecnología escogida.

Distinguiremos dos tipos de sustratos en función de la humedad que tengan: aguas residuales y residuos orgánicos. Las tecnologías de los digestores serán diferentes para cada tipo de corriente, que pueden ser de orígenes muy variados: crianza de animales, restos vegetales de cosecha, domiciliarios o de industrias agroalimentarias.

## 1.3 Tipos de tecnología digestores anaerobios

En función del entorno rural o industrial que rodee al emplazamiento de un reactor determinado se seleccionará la tecnología a emplear. Si el entorno es industrial, se podrá optar por alguna de las tecnologías más complejas, existiendo modelos patentados que se usan en grandes industrias agroalimentarias.

Los sistemas descritos a continuación son sistemas continuos, no tipo batch. Estos tienen como ventaja que funcionan de forma continuada, sin necesidad de muchas tareas de mantenimiento y la producción de gas es constante. También se describirán los sistemas batch o discontinuos, en los que se basa este proyecto, y que pueden convertirse en sistemas continuos de producción de gas si disponemos de distintas unidades en paralelo.

Así, dentro de los tipos de plantas, las tipo batch se cargarán de forma discontinua, pudiéndose dejar una fracción de sustrato digerido para activar la población bacteriana. El proceso de digestión se continúa hasta que la producción de gas es tan baja que mantenerlo funcionando es inviable económicamente. Entonces la planta se lava y rellena de nuevo. Las plantas tipo batch son adecuadas para la digestión de pajas, materiales fibrosos con alto contenido en sólidos, usualmente en áreas con pocas lluvias, y como uso puramente demostrativo o experimental.

Cuando se digieran de forma conjunta estiércol y vegetales, en el caso de plantas en entornos rurales, podemos idear sistemas de llenado y vaciado de vegetales cada 6 meses, aún con el funcionamiento continuo de la planta, puesto que se requiere de un tiempo de retención diferente para cada grupo. En el caso de instalaciones experimentales como la desarrollada en este proyecto, los tiempos de retención serán mucho menores y los llenados y vaciados se realizarán cada poco tiempo.

Las plantas continuas son aquellas que se introduce biomasa de forma constante, haciendo constante la cantidad de sustrato en el interior del digestor. En la práctica estas plantas son cargadas una o dos veces al día. La ventaja es que como las bacterias reciben alimento constante, la producción de gas es también constante. El problema puede surgir con las alimentaciones con materiales fibrosos, que tienden a flotar formando una capa espumosa, como una costra, que impide la generación y recolección de gas. Esto puede solucionarse agitando la materia interior del digestor o alargando el tiempo de retención de la mezcla.

En función de la humedad o los sólidos totales existentes en el sustrato, diferenciaremos dos tecnologías, las de aguas residuales con alta carga orgánica disuelta y las de residuos orgánicos con un porcentaje de humedad no menor del 60%. Las tecnologías con alto contenido orgánico o de residuos orgánicos (ST mayor de 15%) y las acuosas o de aguas residuales.

### 1.3.1 Aguas residuales

Para obtener un mayor rendimiento del proceso de depuración de aguas residuales, se aplican conjuntamente tratamientos aerobios y anaerobios.

Tratamiento principal	ANAEROBIO			AEROBIO		
Productos	Agua	Fango	Gas	Agua	Fango	
Post- tratamiento fango	AEROBIO			ANAEROBIO		
Productos	Fango		Agua	Fango	Agua	Gas

Tabla 4: Productos tratamientos Aerobio y Anaerobio

Las corrientes de agua residual que contienen gran cantidad de materia orgánica disuelta pueden tratarse mediante la digestión anaerobia. En este tipo de aguas residuales debe asegurarse un tiempo de contacto suficiente entre las sustancias disueltas y los microorganismos. Será importante aplicar sistemas que independicen el **tiempo de residencia hidráulico  $\theta$**  del **tiempo de residencia celular  $\theta_c$** , que se explicarán a continuación:

- Se entiende por **tiempo de residencia hidráulico ( $\theta$ )** al tiempo que transcurre entre que entra y sale un volumen unitario de agua. Así teóricamente, en unidades de días, corresponde al caudal introducido a diario dividido por el volumen del reactor. La teoría diferirá de la práctica cuando se creen corrientes preferentes y zonas muertas en el digestor. Hay sistemas que evitan este hecho en el diseño de la planta, como disponer pantallas en el interior del reactor.
- El **tiempo de residencia celular ( $\theta_c$ )** es el período medio de residencia de las bacterias dentro del reactor. Si las bacterias son llevadas por la corriente del sustrato que se digiere, el tiempo de residencia hidráulica será igual que el tiempo de residencia celular. Si esto ocurre, las bacterias no tendrán tiempo de desarrollarse, por lo que no se llevará a cabo la descomposición anaerobia, creándose así el efecto de lavado o wash-out de las bacterias.

Los digestores de “alta velocidad” tienen tiempos de residencia hidráulica bajos, con elevados niveles de depuración y de producción de energía por unidad de volumen. Esto se consigue a partir de la retención de biomasa activa, que independiza el tiempo de residencia celular del tiempo de residencia hidráulica, llegándose a obtener tiempos de residencia hidráulica menores al tiempo de wash-out o lavado de un digestor de tanque agitado. En función del medio de retención de los digestores con retención de biomasa tenemos:

- Sin fijación sobre soporte: contacto anaerobio y UASB
- Con fijación sobre soporte: filtro anaerobio, película fija y flujo descendiente, lecho expandido

Para independizar estos dos factores, se usan sistemas que sirven de soporte a las bacterias, y quedan dentro del reactor sin ser arrastradas por la corriente. Esto se puede realizar bien mediante soportes de distintos materiales, siempre que estos sean inertes (plástico, cerámica, piedras... aunque estas últimas suponen un peso y volumen del reactor muy elevado, que se desaconseja) o bien creando gránulos de materia orgánica que sedimentan con facilidad y se recirculan dentro del reactor.

La digestión anaerobia es una tecnología que produce un gas aprovechable, y es muy adecuada para aguas con alta carga orgánica, puesto que si realizara un tratamiento aerobio existiría un consumo de energía muy elevado, con su consiguiente coste. Se puede reducir el tiempo de residencia hidráulica  $\theta$  tanto aumentando la temperatura de trabajo como aumentando la concentración de microorganismos en el reactor.



Cabe recordar que la digestión anaerobia elimina la materia orgánica hidrocarbonada, pero no otros nutrientes, así que tendrá que considerarse como pretratamiento en algunos casos. En el tratamiento, la formación de metano es lo único que contribuye a eliminar la DQO del agua.

El diseño habitual de este tipo de plantas se basa en la eliminación extensiva de la materia orgánica biodegradable, y varía en función de la tecnología aplicada y la corriente a tratar. No se puede desarrollar un sistema de eliminación parcial, debido principalmente al crecimiento lento de las bacterias metanogénicas. Estas precisan de poca carga y materia orgánica hidrolizada y convertida en ácidos grasos de cadena corta. Para evitar la inhibición de la producción del gas, todos los ácidos volátiles deberán ser convertidos, impidiendo así el tratamiento parcial de la corriente.

Los principales componentes de una planta de tratamiento anaerobio son:

- 1º Pretratamiento mecánico: rejillas, tamices, cámaras de sedimentación
- 2º proceso principal: distintos tipos de reactores

Los puntos clave de diseño serán:

- *Distribución agua residual*: localizada en la parte inferior del reactor. Una distribución y aportación homogénea es una de las claves para garantizar la eliminación de materia orgánica.
- *Separación de tres fases*: permite la extracción del agua tratada sin perder el fango y la recolección del gas.
- *Post-tratamiento*: para cumplir estándares de calidad, eliminar patógenos y reducir cantidad de nutrientes (lagunas o sistemas aerobios).
- *Tratamiento del fango*: fundamentalmente el secado en lechos de secado.
- *Uso del gas*: in-situ aprovechar para obtener electricidad, calor. Sino quemarlo en antorchas.
- *Agua tratada, fango, compost producido*: usados en agricultura.

Los parámetros de las aguas residuales que nos condicionarán el diseño y la tecnología son:

- Cantidad de agua producida
- Fluctuaciones estacionales
- Características químicas y biológicas (temperatura, sustancias tóxicas, volumen producido, etc.)

Lo óptimo será tratar un caudal constante.

A continuación se describen los dos tipos básicos de sistemas de digestión anaerobia de aguas residuales, en función de la forma en que se fijan las bacterias para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica de forma anaerobia. Se menciona también la necesidad de cierto tipo de pretratamiento en algunos casos de aguas residuales.

#### 1.3.1.1 Pre-tratamientos

Utilizados principalmente para conseguir una separación por fases, y así posteriormente poder tratar la fracción líquida separada de la fracción sólida, que puede ser tratada en un digestor convencional. La filtración como pretratamiento será imprescindible si el afluente es susceptible de colapsar el reactor.

#### 1.3.1.2 Plantas sin fijación sobre soporte: UASB y contacto anaerobio

Son similares a una planta de fangos activados (reactor aerobio de tratamiento de aguas). Esta tecnología se usa a menudo en las industrias agroalimentarias. El lodo es mezclado mecánicamente con el gas mediante el bombeo del agua. A continuación se describen los dos tipos de digestores más importantes, el digestor de contacto anaerobio y el digestor UASB:

- Digestor de contacto anaerobio:

Se realiza una separación y reciclaje de los sólidos suspendidos al digestor. Puede haber problemas si el efluente no sedimenta correctamente, o si existen en éste sólidos suspendidos inertes, ya que estos se acumulan.

Un efluente con carga orgánica soluble 1500-50000 mg/l DBO, se elimina un 85-90%, con una producción de gas de 0,8 m<sup>3</sup>/ kg DBO añadida. Es la planta más típica.

- Digestor UASB (up-flow anaerobic sludge blanket):

También denominado RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente).

Digestor con un lecho de biomasa activa en forma de fango granular, pueden ser flóculos o en funcionamiento ideal, gránulos (asociaciones simbióticas de microorganismos), llegándose a obtener concentraciones de fangos en el fondo del lecho de 150 a 300 kg/m<sup>3</sup>mezcla (gránulos) y de 13 a 30 kg/m<sup>3</sup>mezcla (biomasa floculenta). Puede trabajar con cargas orgánicas de hasta 25 kg DQO/m<sup>3</sup>mezcla/día con producciones de gas volumétricas de 6 a 9 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>mezcla/día. Substratos que tengan sólidos inertes suspendidos pueden tratarse si sedimenta antes la biomasa activa, siendo esto poco usual. El fango granular obliga a tener especial atención a la puesta en marcha y evitar que se puedan formar canalizaciones entre los gránulos (recae en el diseño de las canalizaciones de alimentación).

Existen posibles modificaciones para mejorar el sistema, como pueden ser:

- incorporación de relleno,
- recirculación efluente (favorece la retención de los gránulos más densos, sería el sistema EGSB, "expanded granular sludge bed"), cuyo inconveniente es el elevado consumo energético.

La versión más aplicada de este sistema es el digestor UASB, que combina un tanque biológico con un tanque de sedimentación.

El proceso anaeróbico de flujo ascendente consiste básicamente en un tanque Imhoff de flujo "al revés", presentando las cámaras de decantación y digestión anaerobia superpuestas. El reactor de lecho de lodo es un digestor tubular, de flujo ascendente, con separación física y recirculación de lodo dentro de la misma unidad. Existe un perfil de sólidos con gran concentración en la parte inferior (lecho de lodo), y mezcla completa entre lodo líquido y gas en las partes superiores del lecho. En la parte superior del digestor existe un separador de fases (sedimentador), en que el lodo retorna a la cámara de digestión provocando, en contracorriente con el flujo ascendente, una mezcla bien uniforme.

El agua de entrada contiene materia orgánica disuelta fácilmente biodegradable. La biomasa forma gránulos esféricos que tienen una elevada concentración de biomasa y una densidad también alta. Si se tiene que la velocidad de sedimentación de los gránulos es mayor que la velocidad de la corriente ascendente de agua, éstos quedarán retenidos en la parte activa de digestión del reactor. La concentración del afluente será de 5-15 kg VSS/m<sup>3</sup>mezcla (7-20 kg DQO/m<sup>3</sup>mezcla en función de la temperatura de trabajo).

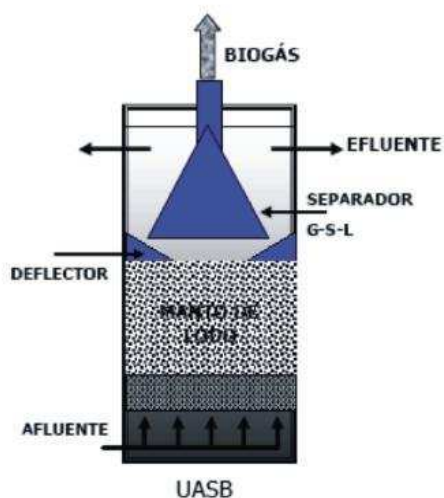


Figura 6: Digestor UASB

Estas plantas pueden causar problemas de separación agua-gas, pero es la planta más generalizada de todas, ideal para aguas con ácido acético, como la hidrolizada de la industria del azúcar o las aguas mieles del pulpado del grano de café. El sistema separador de tres fases de la parte superior es el elemento más delicado, que deberá idearse para separar los gránulos de biomasa, la corriente acuosa y el gas.

Se consigue un nivel de eliminación de la DQO del 80-90%.

#### 1.3.1.3 Plantas con fijación sobre soporte: filtro anaerobio, película fija y flujo descendiente, lecho expandido

Este tipo de plantas trabajan con una cantidad muy baja de sólidos suspendidos, puesto que si no se colapsan. A su vez, esto hace que no precisen de sedimentación final, puesto que el efluente presenta muy pocos sólidos. Tienen biomasa suspendida, sobre todo los del tipo lecho expandido. El filtro anaerobio es el más común de estos, con filtros de plástico, sumergidos y con flujo ascendente. Se usa arena como medio de transporte, siendo necesaria su recirculación para mantener la capa filtrante. Puede haber problemas hidráulicos ya que la producción de burbujas de gas puede inhibir la separación de agua y gránulos en la parte superior del filtro. Las burbujas de gas también pueden causar problemas por adhesión en el biofilm. El medio filtrante tiene que limpiarse mecánicamente, puesto que en esto radica la calidad de este sistema, que integra el pretratamiento.

Existen distintos tipos: filtro anaerobio, película fija y flujo descendiente, y finalmente de lecho expandido. El lodo de salida estabilizado puede concentrarse y desecarse directamente.

- Digestor de filtro anaerobio:

Consta de una columna de relleno a través de la cual se hace pasar la corriente residual. En función del material y la forma tardará más o menos en formarse la película de microorganismos. Ladrillo o piedra sería buen material, pero son demasiado pesados.

El flujo es ascendente, normalmente. Pueden aparecer problemas por acumulación de biomasa u obturación por sólidos en la alimentación. Presenta flexibilidad para resistir largos períodos de abstinencia o absorber variaciones de las cargas aplicadas.

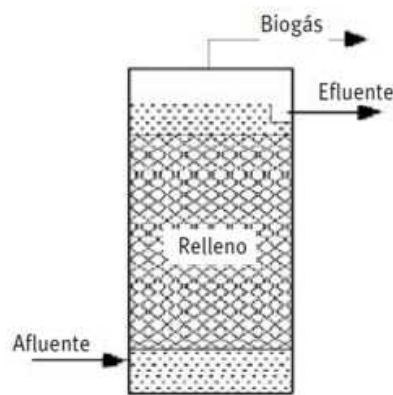


Figura 7: Digestor de filtro anaerobio

- Digestor de película fija DSFF (down-flow stationary fixed film):

Es un recipiente cilíndrico o prismático que contiene superficies en la dirección del flujo, donde se fija la masa bacteriana, disminuyendo la posibilidad de obturación por sólidos en suspensión. Pueden también aguantar períodos sin alimentación y absorber variaciones de carga. Puede haber problemas de colapso por excesiva acumulación de masa bacteriana en corrientes muy cargadas así como problemas con su peso.

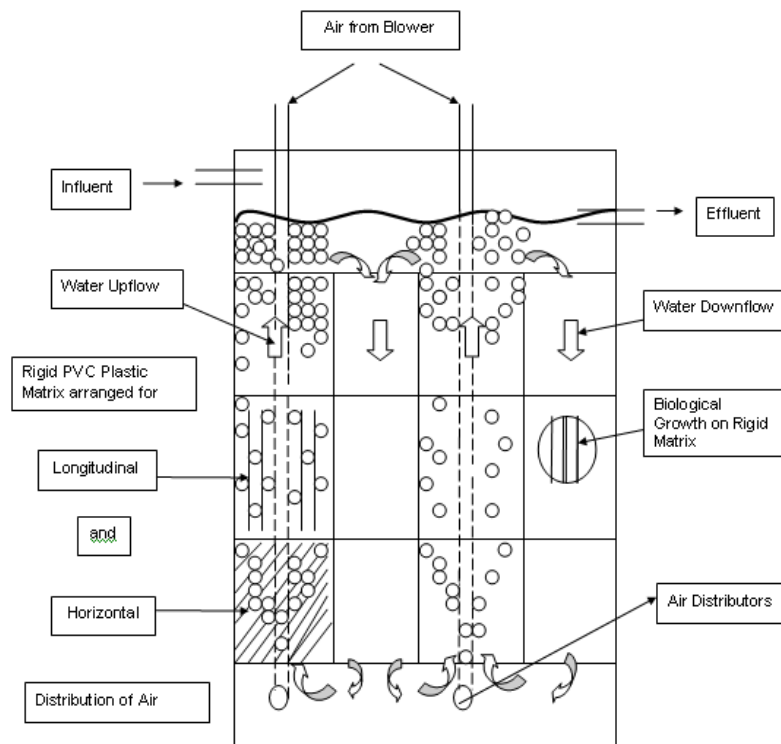


Figura 8: Digestor de película fija

- Digestor de lecho expandido:

Consiste en una columna donde se dispone en su interior un soporte disperso, esférico, donde se fijan los microorganismos. Es de flujo ascendente y con un caudal determinado se expande el lecho de partículas. Para disminuir el consumo energético asociado, se precisa de una densidad baja, también de una fácil separación de la corriente (mediante esferas de carbón activo de 175-200 micras). Una alta concentración de biomasa permite trabajar con corrientes muy poco cargadas, funcionando a temperatura ambiente, y pudiendo afrontar sobrecargas, variaciones de temperatura y de caudal. Como inconvenientes encontramos la elevada razón de recirculación, con el consiguiente gasto energético.

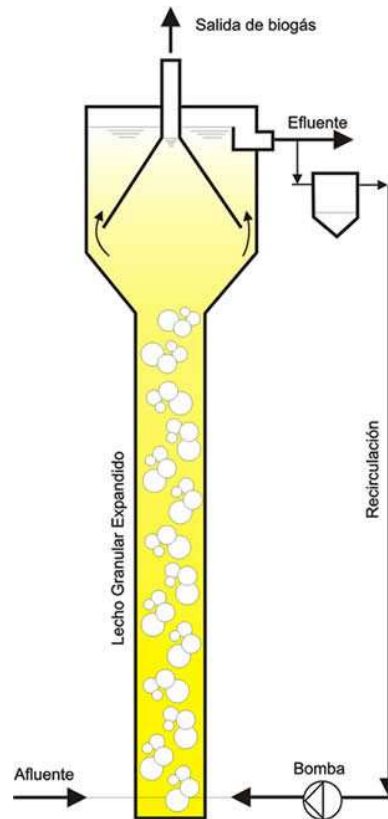


Figura 9: Digestor de lecho expandido

### 1.3.2 Residuos orgánicos

#### 1.3.2.1 Digestor de cubierta fija o tipo chino

Esta es la tipología de planta más sencilla de explotación debido a que no tiene partes móviles, tiene un diseño muy compacto que ahorra espacio, está bien aislada térmicamente, tiene unos costes asequibles y normalmente está enterrada.

La construcción es laboriosa y necesita mano de obra con cierta preparación, así como técnicos experimentados en el tema que hagan la supervisión adecuada, debido al hecho que la parte superior o cúpula deberá ser estanca al gas para su correcto funcionamiento, puesto que debe almacenarlo sin pérdidas, por lo que se hace compleja su construcción, aumentando el coste. Ni el hormigón, cemento o albañilería son estancos al gas. Por tanto se usará pintura estanca al gas para asegurar esta propiedad de la cúpula.

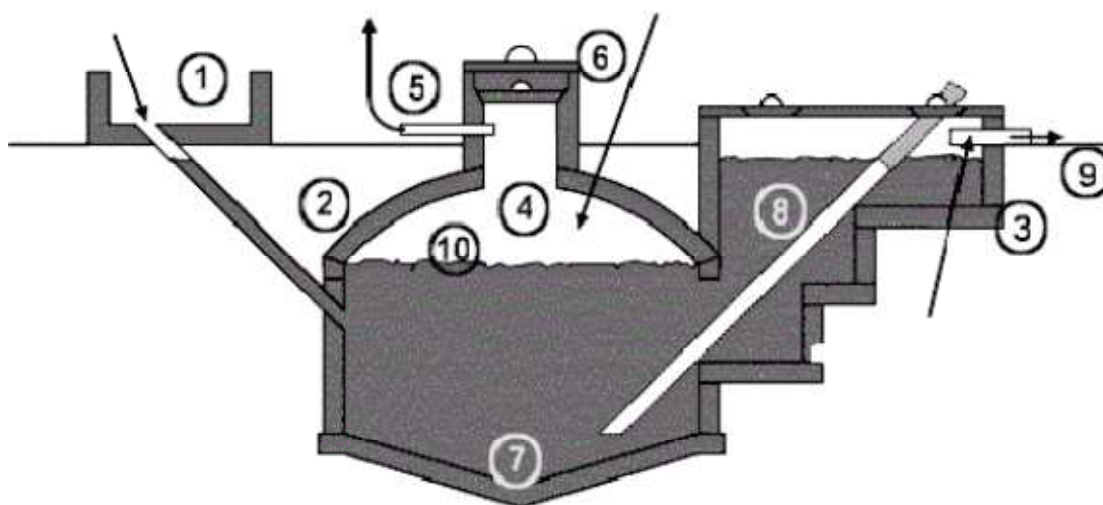
Tiene una vida útil muy larga, que puede ser de 20 años o más, por lo que los costes de amortización de la planta son relativamente bajos.

Cuando la producción de gas empieza, se desplaza el sustrato a la cámara de expansión, acumulándose el gas en la cúpula. La presión aumenta con la acumulación del gas. La presión del gas viene dada por la altura de sustrato acumulado en la cámara de expansión.

La generación de gas es igual que en un digestor de cúpula flotante, siempre que se asegure la estanqueidad del gas. Su uso no es tan efectivo, puesto que la presión del gas dentro del recinto fluctúa en función del consumo y la producción, por lo que la red de gas presenta oscilaciones que pueden dificultar su uso. La mejor solución en este caso es la instalación de un depósito acumulador intermedio y dotado de regulador de presión.

Otra de sus características importantes es la elevada flexibilidad de tamaño con la que funcionan, pudiéndose adaptar a producciones muy dispares de estiércol que determinen volúmenes de construcción desde 5 m<sup>3</sup> a 200 m<sup>3</sup>.

A continuación podemos ver un esquema básico de un digestor de cubierta fija:



1	Tanque de mezcla, con el conducto de entrada y retención de arenas.	6	Escotilla de entrada, sellada para evitar fugas de gas
2	Digestor	7	Acumulación de lodo denso
3	Tanque de compensación y de salida	8	Cañería de salida
4	Almacenaje de gas	9	Nivel de referencia
5	Cañería de salida del gas	10	Espuma sobrenadante

Figura 10: Digestor cubierta fija



Los digestores de cubierta fija tienen como principales parámetros de elección de materiales de construcción:

- Adaptación técnica - estabilidad, estanqueidad para líquidos o gases.
- Relación coste - efectividad
- Disponibilidad de materiales en la región y costes de transporte
- Disponibilidad de trabajadores familiarizados con los materiales específicos de construcción

**- Ventajas:**

- Coste de construcción relativamente bajo por su larga vida útil.
- Ausencia de partes móviles o de acero.
- Si está bien construido, gran durabilidad, por lo que su coste se amortiza en un largo período de tiempo .
- La construcción subterránea ahorra espacio, es compacta y aislada de agresiones externas o cambios de temperatura.

**- Desventajas:** los principales problemas suceden por la pérdida de estanqueidad de la cúpula (una pequeña rotura puede provocar importantes pérdidas):

- La presión del gas fluctúa ampliamente en función de la cantidad de gas almacenado, complicando su aprovechamiento.
- No se conocen la producción o la cantidad de gas almacenado de forma visible.
- No es fácil de entender la operatividad de la planta.
- La construcción en suelos rocosos conllevará un aumento del coste económico.
- Aún estando construido bajo suelo, la temperatura del reactor es baja.

Existen diferentes tipos de diseño de plantas de cúpula fijo. No existe ningún diseño que sea perfecto, por lo que es recomendable adaptarlo a las necesidades concretas del emplazamiento con pequeñas variaciones. Algunos tipos son:

- Digestor tipo chino: es el arquetipo de estos digestores. Se han construido millones de estas plantas en la China. El diseño consiste en un cilindro, con la parte superior e inferior redondeadas.
- Modelo Janata: desarrollado en la India, ya no se construyen puesto que aparecían roturas en la cúpula del gas.

- Deendandhu: fue el sucesor del modelo anterior en la India. Es un modelo mejorado, que no presenta roturas en la cúpula y usa menos cantidad de materiales constructivos.
- Modelo CAMARTEC: tiene la estructura simplificada de un reactor hemisférico, basado en la construcción de un anillo rígido de fundamento y una unión calculada entre la parte estanca al líquido y la estanca al gas llamada anillo fuerte / anillo débil. Se desarrollo en Tanzania en los años ochenta.

#### 1.3.2.2 Digestor de cúpula flotante o modelo Hindú

Consiste en un digestor subterráneo y una parte móvil superior que sirve de almacén para el gas. La cúpula de gas flota directamente sobre el sustrato en digestión o en una película acuosa, disponiendo de algún tipo de guía externa para evitar las desviaciones en la trayectoria de la cúpula y que a la vez permita retirar el tambor flotante para hacer el mantenimiento. El gas se almacena en la cúpula, desplazándose ésta hacia arriba cuando se acumula y hacia abajo cuando el biogás se consume, así que el nivel de la cúpula dependerá del gas almacenado.

La cúpula puede desplazarse directamente sobre el lodo que está siendo digerido o bien sobre una película acuosa. Si se incorpora esta película acuosa, la cúpula no quedará encallada, aún tratándose un sustrato con alto contenido en sólidos, y el aumento del coste de la construcción es muy bajo. Tenemos a la vez una mejora en las condiciones higiénicas.

Este tipo de reactor es más sencillo de construir, ya que no precisa de la cúpula estanca para el almacenamiento del gas, ya que éste se almacena en la cúpula móvil de acero o fibra de vidrio con resina de poliéster. En ningún caso podrá confeccionarse con PVC o materiales plásticos ya que estos se degradan con el sol a lo largo del tiempo.

La presión de acumulación del gas es constante en este caso por el propio peso de la cúpula, y elimina los problemas descritos en el apartado anterior, haciendo más fácil el uso posterior del biogás.

Esta tipología de reactor permite conocer fácilmente en todo momento la cantidad disponible de gas en función de la posición de la cúpula. Además podemos mostrar muy fácilmente el funcionamiento operativo y detectar los posibles problemas de explotación que puedan presentarse.

El tamaño usual de este tipo de plantas depende de si es de uso familiar, de tamaño pequeño o medio ( $5 \text{ y } 15 \text{ m}^3$ ) o de si son de uso comunitario o gran escala ( $20\text{-}100 \text{ m}^3$ ).

El digestor se construye usualmente con ladrillos, hormigón o de mortero de caliza y yeso. La cúpula consiste normalmente en planchas de acero de 2,5 mm de espesor para los laterales y de 2 mm en la parte superior. Deberá protegerse el tambor flotante contra la corrosión. Las pinturas que pueden usarse pueden ser oleosas o con disolvente, sintéticas o plásticas, bituminosas, aplicándolas en un mínimo de dos capas preliminares y una capa final.

Si el color de la cúpula es oscuro o rojizo se incrementará la producción de gas por el aumento de la temperatura del digestor con la radiación solar. Si se usa otro tipo de material para la cúpula deberá asegurarse la estanqueidad al gas con una capa de pintura especial.

A continuación podemos ver un esquema explicativo de este tipo de digestor:

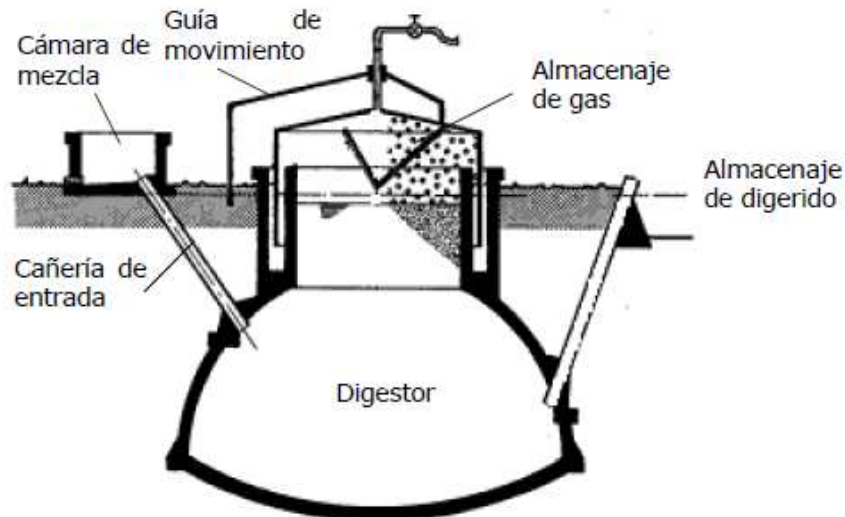


Figura 11: Digestor de cúpula flotante

Se puede sustituir el tambor flotante por una lona que almacene el gas, pero esta tendrá una vida útil más corta, resultando muy susceptible a las agresiones externas. Además, una vez finalizada su función, se convertirá en un residuo inorgánico de difícil tratamiento y disposición.

Ejemplo de digestor tipo hindú:



Figura 12: Digestor tipo hindú

Algunos de los tipos de diseños son:

- Modelo KVIC – con un digestor cilíndrico, es el modelo más antiguo y más extendido. Su origen es de la India.
- Modelo Pragati – con un digestor hemisférico
- Modelo Ganesh – fabricado con acero angular y lámina de aluminio plástica
- Digestor de cúpula flotante de partes de hormigón prefabricado
- Digestor de cúpula flotante de fibra de vidrio reforzado con poliéster
- Modelo BORDA – combina las ventajas de un digestor hemisférico con la estabilidad del proceso de la cúpula flotante y la mayor vida útil por el uso de película hidráulica para el desplazamiento.

**- Ventajas:**

- Facilidad para comprender la operatividad gracias a la cúpula flotante.
- Volumen de gas almacenado muy visible, equivalente al desplazamiento de la cúpula.
- Presión de gas constante, determinada por el peso de la cúpula.
- Construcción relativamente sencilla, siendo los defectos que se producen en esta fase, poco consecuentes con la operatividad de la planta.
- No se precisa de estanqueidad del reactor al gas, si el mantenimiento de la cúpula es regular y correcto.

**- Desventajas:**

- Elevado coste de la cúpula de acero, y la susceptibilidad a la corrosión, que conlleva un mantenimiento intensivo.
- Mantenimiento de las partes móviles, con una regularidad mínima anual.
- La cúpula debe protegerse regularmente con pintura y aún así, su vida útil es sensiblemente más corta, unos 15 años como máximo y sólo unos 5 años en zonas tropicales costeras con condiciones muy agresivas.
- Si se tratan elementos orgánicos fibrosos y la cúpula se desplaza sobre el propio lodo del reactor, esta presenta una gran tendencia a encallarse.

Por todo ello, más coste y menos vida útil, la amortización será muy superior al digestor de cubierta fija.

### 1.3.2.3 Digestor esférico

Este tipo de digestor es el más sencillo de los tres. Consiste en una bolsa de plástico o caucho (como por ejemplo PVC) termo soldado que realiza la función de digestor y almacén del gas simultáneamente. La parte superior de la bolsa almacena el gas. Los conductos de entrada y salida se unen directamente a la superficie de la bolsa. La presión del gas será la que permita la elasticidad del material, o la que se obtenga de disponer pesos en la parte superior de la bolsa.

Tienen una vida útil muy corta, de entre 2 a 5 años debido a la naturaleza de los materiales constituyentes.

Ejemplo de un digestor tipo esférico de cubierta flexible:



Figura 13: Digestor esférico

También podemos encontrar una variante de este tipo de biodigestor que se basa en la misma tecnología pero variando la forma del digestor, siendo ésta de tipo tubular, como se puede apreciar en la siguiente imagen:



Figura 14: Digestor tubular



**- Ventajas:**

- Fabricación en serie a bajo coste.
- Fácil transporte; bajo nivel de sofisticación para la construcción.
- Fácilmente instalables en zonas donde el nivel freático esté muy próximo a la superficie.
- Provee elevadas temperaturas de digestión en climas soleados y cálidos.
- Es fácil de lavar, vaciar y mantener.

**- Desventajas:**

- Las bajas presiones de gas pueden obligar al uso de bombas.
- No se puede retirar la espuma durante la operación.
- La bolsa de plástico tiene una vida útil muy corta y está muy expuesta a roturas sin posibilidad de reparación local.
- No crea empleo local, puesto que los técnicos locales no están normalmente capacitados para reparaciones del caucho.
- Constituye un residuo difícil de tratar al final de su vida útil.

1.3.2.4 Tabla comparativa de tecnologías

Diseño /criterio	Digestor cúpula flotante	Digestor cúpula flotante de película acuosa	Digestor de cúpula fija	Digestor esférico
<b>Principio de diseño</b>	Alimentación continua, digestor mixto	Alimentación continua, digestor mixto	Alimentación continua, digestor mixto con almacenaje de biol	Alimentación continua, canal de fermentación
<b>Componentes principales: digestor/almacenaje de gas</b>	Digestor construido, almacenaje de gas en tambor flotante metálico	Digestor construido, almacenaje de gas en tambor flotante metálico, en película acuosa separada	Digestor construido, con fosa excavada	Digestor y almacenaje de gas integrados, de material plástico
<b>Sustratos más adecuados</b>	Estiércol animal, con o sin residuos vegetales	Estiércol animal, con o sin residuos vegetales	Estiércol animal más residuos vegetales	Estiércol animal, solamente
<b>Vida útil prevista</b>	8-12 años	10-15 años	12-20 años	2-5 años





Diseño /criterio	Digestor cúpula flotante	Digestor cúpula flotante de película acuosa	Digestor de cúpula fija	Digestor esférico
<b>Volumen del digestor</b>	6-100 m <sup>3</sup>	6-100 m <sup>3</sup>	6-20 m <sup>3</sup>	4-100 m <sup>3</sup>
Conveniencia				
<b>Ventajas</b>	Fácil construcción y operación, presión uniforme de gas, tecnología madura	Muy fiable, fácil construcción y operación, presión uniforme de gas, vida útil larga, tecnología madura	Coste de construcción bajo, vida útil larga, buen aislamiento	Construcción prefabricada, fácil operación
<b>Inconvenientes</b>	La cúpula de metal puede oxidarse	Coste elevado	Aislamiento de la parte superior de almacenaje de gas, fluctuación de la presión de gas	No se construye in-situ, vida útil corta (2-5 años) de material plástico, producción de gas baja
Todas las plantas precisan de un control rutinario y cuidadoso de los almacenajes del biogás				
<b>Operación y mantenimiento</b>	Simple y sencillo, necesidad de pintar regularmente la cúpula de gas	Simple y sencillo, necesidad de pintar regularmente la cúpula de gas	Fácil después de una cuidadosa familiarización con la planta	Fácil, control regular de los pesos de presión del gas
<b>Producción diaria de gas</b>	0,3-0,6	0,3-0,6	0,2-0,5	0,3-0,8
En m <sup>3</sup> de gas por m <sup>3</sup> de volumen de digestión. Depende del sustrato, aquí estiércol vacuno				
<b>Elementos costosos</b>	La cúpula metálica de gas, el digestor	La cúpula metálica de gas, el digestor	La combinación de digestor y acumulador de gas; la excavación	La lona de plástico
<b>Usos recomendados</b>	Muy desarrollado, fiable en tamaños familiares	Igual que cúpula flotante, más una vida útil más larga y una mayor fiabilidad operacional	Equipo no muy caro, bueno para residuos agrícolas, construcción cara, con experiencia necesaria	Para plantas de gran escala o soluciones rápidas

Tabla 5: Comparativa tecnologías digestión anaerobia

## 2. INTRODUCCIÓN GENERAL A PLANTA DISCONTINUA EN LABORATORIO

### 2.1 Planta discontinua en laboratorio

Tanto en este apartado como en el siguiente (2.2 Implantación de un biodigestor de laboratorio), se describirán, para un biodigestor discontinuo en general, todas las características de funcionamiento del digestor, los distintos parámetros de control, así como la implantación del mismo. Posteriormente nos centraremos con mayor profundidad en el biodigestor construido para este proyecto en concreto.

#### 2.1.1 Digestión biológica anaerobia

Como ya hemos explicado ampliamente, los procesos anaerobios se basan en la transformación de la materia orgánica en biogás y microorganismos por medio de otros microorganismos, quedando restos no biodegradables.

El digestor más común es el del tipo mezcla completa, que utilizaremos en nuestro experimento, que consiste en un depósito cilíndrico, con fondo cónico. Los gases que se desprendan en la digestión se almacenarán en un depósito externo conectado directamente al depósito cilíndrico que ocupan los fangos.

Es importante que una vez realizada la digestión ácida, ésta no vuelva a tener lugar en el digestor. Para ello se debe vigilar el pH, manteniéndolo ligeramente alcalino (en torno a 7.4). Esto sucederá de manera espontánea si el digestor opera correctamente, es decir:

- Sin sobrecargas por puntas de caudal o contaminación
- Alimentación lo más constante posible
- Mantenimiento de la temperatura constante
- Buena agitación para buen contacto de alimento con microorganismos y para evitar que se produzca estratificación o acumulación en ángulos y zonas muertas
- Evitando los productos tóxicos

Los substratos con los que alimentamos al digestor pueden contener alrededor de un 70% de sólidos volátiles, de los cuales un 50% son destruidos en una buena digestión, lo que implica que la concentración del fango digerido se reduce respecto a la alimentación de entrada. Los sólidos destruidos se transforman en energía, microorganismos del medio y gases de digestión.

En el proceso de digestión anaerobia uno de los factores esenciales es la temperatura; el aumento de la temperatura reduce el tiempo de digestión, e incrementa la producción gaseosa. Debido a esto, lo óptimo sería que los digestores funcionaran a la más alta temperatura posible, pero esto produciría problemas en el funcionamiento del digestor.



Para trabajar a dicha temperatura es necesario un aporte de calor al digestor que se realiza con un doble fin: calentar el fango a la temperatura deseada y compensar las pérdidas de calor en paredes y fondo. Dicha aportación de calor se puede realizar de las siguientes formas:

- Circulación de los lodos por un intercambiador de calor por medio de un sistema de bombeo.
- Circulación de agua caliente por tuberías interiores (posibles problemas de incrustaciones y atascos de difícil limpieza)
- Calentamiento de los fangos en intercambiador de calor antes de alimentar el digestor

Los intercambiadores de calor disponibles son:

- De tubo-carcasa: fácil de limpiar y evita atascaos, pero ocupa mucho volumen y es caro
- De doble tubo: menos volumen necesario, pero se atascan fácilmente y su limpieza es complicada
- De espiral: características de atascamiento intermedias respecto a los anteriores, se limpian abriendo la tapa frontal

El contenido del digestor debe mantenerse bien mezclado, para evitar zonas muertas o formación de costras. Para ello existen distintos métodos:

- Agitación con gas
- Bombas de gran caudal, que aspiran una columna central de fango y lo inyectan de manera secuencial por boquillas situadas a varios niveles
- Mecanismos internos como turbinas superficiales, tornillos, mezcladores etc.

- Gas producido:

El gas producido en la digestión oscila, en general, entre 800 y 1000 litros por cada kilo de materia volátil destruida. Está compuesto por metano 50-70% en volumen,  $\text{CO}_2$  25-30% y otros gases en pequeñas cantidades, como  $\text{SH}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , etc. La composición de sustrato a digerir puede influir en la composición del gas. Por ejemplo, las grasas producen más metano que las proteínas y estas más que los carbohidratos.

La densidad del gas respecto al aire es de 0.86, y su poder calorífico se estima entre 5700 Kcal/m<sup>3</sup> y 6200 Kcal/m<sup>3</sup>, en función de la concentración de  $\text{CH}_4$ .

Con el fin de no tirar el gas cuando hay excedente, se procede a su almacenamiento, utilizando para ello digestores con techos flotantes, gasómetros y esferas a presión, entre otros.

Es muy importante tomar precauciones en el manejo y almacenamiento del gas, ya que una mezcla de metano y aire puede dar lugar a explosiones graves. Tuberías y depósitos deben contar con elementos de seguridad para impedir riesgos de explosión.

- Nutrientes:

Los procesos anaerobios requieren menos nutrientes que los aerobios debido a que hay menos síntesis celular. Al igual que en el caso anaerobio, los nutrientes necesarios son N y P. La relación  $DBO_5/N/P$  es del orden 100/0,5/0,1, siendo en los reactores aerobios 100/5/1, por lo que no suele ser necesario dosificar nutrientes.

Otros elementos pueden ser necesarios en cantidades muy pequeñas, pues estos pueden provocar mejoras en el proceso. Ejemplos de estos elementos son: hierro, níquel, cobalto, molibdeno, etc.

### 2.1.2 Demanda biológica de oxígeno

La demanda biológica de oxígeno es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de toda la materia orgánica biodegradable por medio de microorganismos aerobios. Se expresa normalmente en mg/L y se encuentra en las aguas en intervalos muy amplios.

Las aguas superficiales suelen presentar unos valores de DBO entre 2 y 100 mg/L, mientras que en las aguas residuales encontramos valores mucho más elevados, situados entre 3000 y 15000mg/L.

En el análisis de la DBO debemos poner la muestra de agua en las condiciones óptimas para que se consuma la materia orgánica. Para ello deberemos introducir la suficiente cantidad de microorganismos, aclimatados al agua que vamos a analizar, y nutrientes que favorezcan las reacciones metabólicas. La incubación se realiza en condiciones operativas definidas: pH neutro, 20°C, oscuridad y agitación. Como tiempo de incubación, se considera como el más adecuado el de 5 días ( $DBO_5$ ).

La relación entre la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) se encuentra entre 0,5 y 0,8, según el tipo de agua.

Para medir la DBO existen diferentes métodos, de los cuales encontramos unos basados principalmente en la medida de la reducción del oxígeno disuelto en la fase líquida y otros basados en la pérdida de presión de a fase gas.

Actualmente el método más utilizado es el que realiza la medida de presión en la fase gas con un sensor electrónico. Las ventajas de este método son las siguientes:

- El sensor utilizado dispone de termómetro y cronómetro
- Almacena los valores de DBO diariamente
- Coste no elevado

Aunque nos centraremos en los valores de  $DBO_5$  (oxígeno total consumido en los cinco primeros días de incubación) resulta interesante realizar una lectura cada uno de los 5 días y representar gráficamente la evolución de la lectura en el tiempo. Una vez obtenidas estas gráficas, podremos deducir:

- Si la evolución ha sido la normal o deseable → Curva 1
- Si existe una falta de aclimatación de los microorganismos → Curva 2
- Si existe presencia de especies nitrificantes → Curva 3

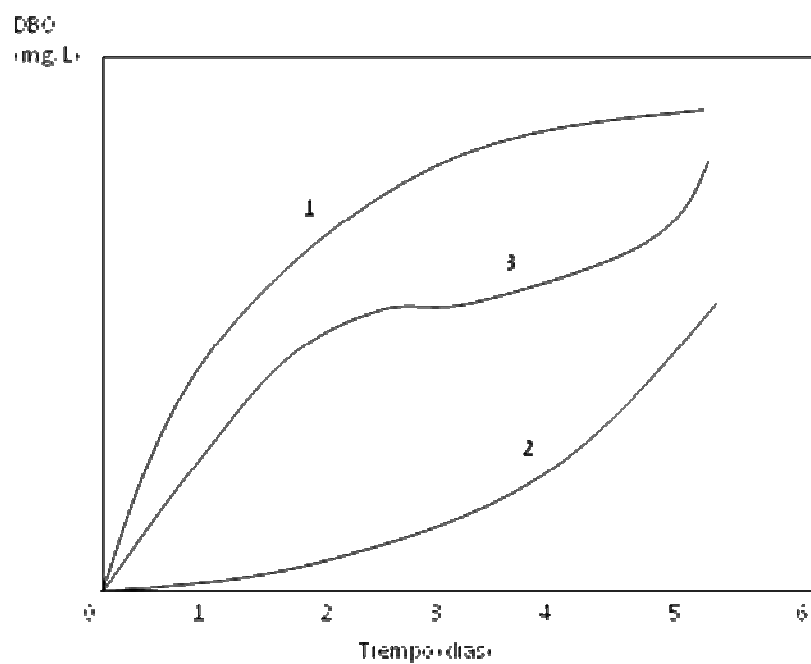


Figura 15: Curvas DBO

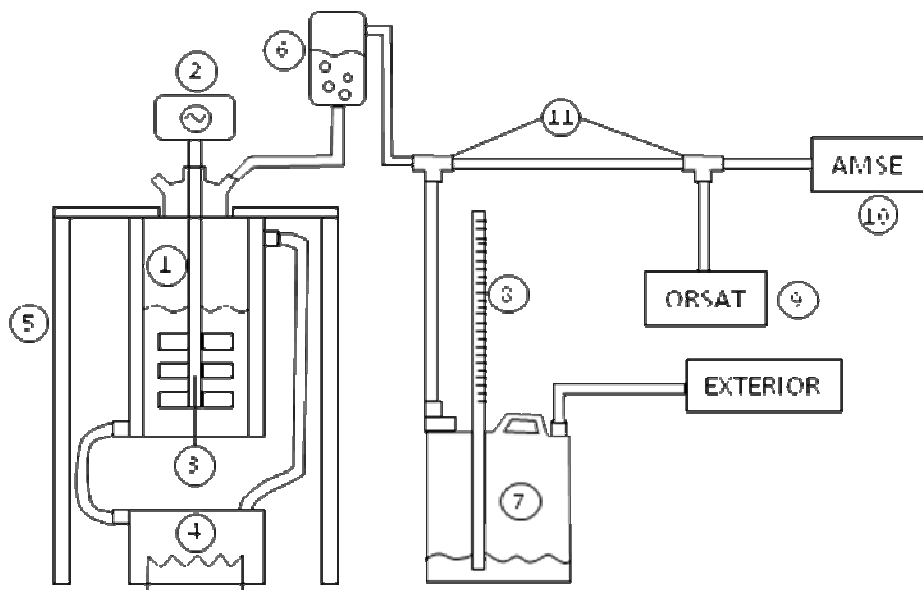
### 2.1.3 Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO), es la cantidad equivalente de oxígeno que consumirían las materias (orgánicas e inorgánicas) presentes en un agua al ser oxidadas a su mayor estado de oxidación.

La DQO es la forma por excelencia para medir el grado de contaminación de un agua.

### 2.2 Implantación de un biodigestor de laboratorio

Los ensayos experimentales se llevarán a cabo cuando interese conocer en qué medida un agua residual es tratable por vía anaerobia, siempre que este tratamiento parezca realizable a la vista de los resultados de caracterización del agua residual. Para ello, se emplean indistintamente reactores de flujo continuo o discontinuo. Para valorar la tratabilidad, el sistema discontinuo resulta más conveniente siendo, además, su funcionamiento menos complicado. La siguiente figura muestra un esquema sencillo general de un sistema de reactor anaerobio en laboratorio:



1	Digestor	7	Recuperador de gases
2	Agitador	8	Manómetro
3	Varilla agitadora	9	ORSAT
4	Baño térmico	10	Calorímetro
5	Estructura/Soporte	11	Válvulas
6	Eliminador CO <sub>2</sub>		

Figura 16: Instalación completa

### 3. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LABORATORIO

A continuación se describirán en profundidad las distintas partes del sistema instalado en el laboratorio, así como las distintas funciones que pueda tener cada una de ellas y la construcción y montaje de las mismas cuando proceda.

#### 3.1 Sistema completo

##### 3.1.1 Soportes (estructura)

Debido a la forma compleja del biodigestor, y a las diferentes salidas y entradas de agua, gases y demás que presenta el mismo, su sujeción es complicada y resulta imposible que se mantenga en pie por sí solo. Debido a ello fue necesaria la construcción de un soporte de metacrilato.

Para ello se utilizaron planchas de metacrilato de aproximadamente 2 cm de grosor, que se cortaron según las medidas adecuadas. La unión entre las mismas se realizó por medio de tornillos y angulares. Para dar una mayor estabilidad a la estructura se acopló una tabla de madera atornillada a la parte trasera. A continuación podemos ver la estructura ya montada:



Figura 17: Soporte

Para un fácil manejo del biodigestor, la parte superior de la estructura se construyó en dos partes, de tal modo que una de las partes sea móvil y se pueda quitar dejando espacio libre para acoplar y desacoplar el biodigestor. En la siguiente figura podemos ver un detalle de lo descrito.



Figura 18: Detalle 1 soporte

Una vez instalado el biodigestor, la parte desplazable se ajusta con dos pasadores para evitar su movimiento y que todo quede bien ajustado y sujeto. La estructura con el biodigestor ya instalado quedaría del siguiente modo:



Figura 19: Detalle 2 soporte

En la imagen también se aprecia la base del sistema agitador, que va atornillada a la parte superior fija, dotando de mayor estabilidad a la tapa evitando que ésta se doble por el peso del digestor cuando éste esté en funcionamiento.

### 3.1.2 Sistema de digestión

#### 3.1.2.1 Biodigestor

El biodigestor es el depósito en el que se introduce la materia orgánica mezclada con el agua y en el cual se producirá la digestión anaerobia de la mezcla, que ya se ha explicado



ampliamente en apartados anteriores, por lo que es una de las partes más importantes de la instalación. Aquí podemos observar una visión general del biodigestor:



Figura 20: Biodigestor

En nuestro caso está construido en vidrio transparente, y consta de las siguientes partes:

- Cilindro contenedor: como se ha comentado anteriormente, está fabricado en vidrio transparente, y constituye el depósito en el que se producirá la digestión de la materia orgánica. Tiene una capacidad de 5L.



Figura 21: Detalle 1 Biodigestor

- Camisa de agua: el biodigestor cuenta con una doble capa de vidrio, quedando una cavidad entre ambas capas por la cual circulará el agua que utilizaremos para controlar la temperatura de la mezcla. Para la entrada y salida del agua el biodigestor cuenta con dos boquillas a distintas alturas para un correcto llenado y buena circulación del agua de refrigeración.



Figura 22: Detalle 2 Biodigestor



- Boquilla de salida: situada en la parte inferior del biodigestor, es utilizada para el vaciado del mismo una vez sea necesario sustituir la materia orgánica ya digerida y comenzar de nuevo el proceso. La salida está controlada por un grifo manual.



Figura 23: Boquilla salida

- Tapa: posteriormente describiremos con mayor profundidad esta parte del biodigestor.

### 3.1.2.2 Baño térmico

Para el control de la temperatura de la mezcla se dispone de un baño térmico, que consta de una resistencia con la que se controla la temperatura del agua que circulará por la camisa de agua anteriormente descrita, Para ello el propio baño cuenta con una bomba que impulsa el agua a través del biodigestor, volviendo de nuevo al baño térmico, cerrándose así el circuito. Es importante un buen ajuste de los tubos en las distintas boquillas, ya sean las del biodigestor o las del baño térmico, para que no se produzcan fugas de agua en el circuito.



Figura 24: baño térmico

En nuestro caso, debido a que, como se ha comentado en anteriores apartados, vamos a trabajar en el rango de las bacterias mesófilas, normalmente entre 25-35°C, mantendremos el agua del baño térmico a unos 30°C aproximadamente mientras dure el experimento.

### 3.1.2.3 Agitación

Para que se produzca una mezcla homogénea del agua y la materia orgánica, así como para que no se produzca sedimentación y la digestión se produzca de la manera más uniforme posible, se ha instalado un sistema de agitación mecánica. Este consta de un agitador regulable con el cual controlamos el nivel de agitación deseado, y de una varilla agitadora fabricada a mano en PVC. Sistema de agitación completo:



Figura 25: Agitador

En cuanto al nivel de agitación, simplemente queremos que la mezcla sea homogénea y la digestión uniforme, por lo que no será necesaria ni conveniente una excesiva agitación, por lo cual se regula una velocidad de giro a pocas revoluciones.

Resulta importante a la hora de situar la base del agitador, que va atornillada a la parte superior de la estructura, el situarla de manera lo más precisa posible para que la varilla quede justo en el centro del orificio superior, de tal forma que la varilla pase justo por la entrada central de la tapa (posteriormente la describiremos). En la siguiente figura podemos ver como la varilla queda bien centrada (en este caso aún no se ha puesto la tapa del digestor):



Figura 26: Detalle Agitador

En cuanto a la varilla, se ha diseñado y construido de tal forma que consigamos el mejor mezclado posible, y evitando a su vez acumulación de materia en las propias palas del agitador por medio de una serie de taladros en las mismas, que además favorecen la aparición de turbulencias. El material escogido ha sido el PVC dado que una varilla de metal podría sufrir oxidación contaminando de este modo la mezcla tratada.

#### 3.1.2.4 Tapa del biodigestor

La tapa del biodigestor, de 75 mm de diámetro, es una de las partes más importantes del mismo ya que será el medio a través del cual no sólo introduciremos la mezcla a digerir, sino que además servirá como base para los sistemas de medición y toma de datos (medidas de temperatura, tomas de muestra de la mezcla para medida del pH y otros parámetros, etc.), así como el punto por el cual se evacuará el gas producido en la digestión y que dirigiremos al sistema de recogida de gases, o a donde convenga (Exterior, calorímetro, ORSAT, etc.) y el punto de paso de la varilla agitadora anteriormente descrita.



Figura 27: Tapa biodigestor

En la anterior imagen podemos observar las distintas boquillas:

- La boquilla central se utilizará para el paso de la varilla agitadora
- Una de las boquillas grandes laterales se utiliza como punto de salida del gas producido en la digestión.
- Las otras dos boquillas laterales (E29/32 E14/23) se utilizarán para introducir los distintos instrumentos de medida según convenga (termómetro, recolección de muestras para analizar, etc.)

Es muy importante que todas estas boquillas queden lo más herméticas posible para evitar la entrada de aire exterior al digestor así como la pérdida de los gases de la digestión al exterior.

La tapa queda bien ajustada al biodigestor por medio de un alambre con tornillo y tuerca para que quede fuertemente sujeto.



Figura 28: Tapa biodigestor instalada

### 3.1.3 Sistema de recogida y análisis de gases

#### 3.1.3.1 Depósito de recogida de gases

Se ha utilizado como depósito un bidón de unos 15L, en el cual se realizaron 3 perforaciones:

- Una para la entrada de gases del sistema de digestión
- Una para la salida de gases del propio sistema de recogida
- Otra para la instalación de un manómetro, con el cual mediremos la presión manométrica de los gases en el interior del bidón.





Figura 29: Bidón

Para la medida de la presión manométrica es necesario que haya cierta cantidad de agua en el fondo del bidón, que al ser empujada por el gas recogido ascenderá a través de un tubo de PVC, y mediante la medida del nivel de agua en el bidón podremos calcular el volumen de gas producido. Posteriormente se suministran las ecuaciones para el cálculo de este volumen a través de las mediciones realizadas.



Figura 30: Detalle manómetro

Todas las entradas y salidas como siempre deben estar lo más herméticas posible, por lo que se han usado uniones macho-hembra con pasadores de goma para mejorar el ajuste.

### 3.1.3.2 Eliminador CO<sub>2</sub> gases

Para eliminar el CO<sub>2</sub> del gas producido en la digestión, haremos pasar el mismo por una disolución de hidróxido sódico (sosa) 1 N. Añadiremos 4 ó 5 gotas de naranja de metilo de tal modo que cuando se agote la disolución tengamos un indicador visual por el cual podamos saber cuándo cambiarla por una nueva. El absorbedor de CO<sub>2</sub> lleva un difusor en la entrada del gas para que se formen burbujas y así favorecer la eliminación de dióxido de carbono. Aún así la eliminación no será total, como podremos comprobar a la vista de los resultados en apartados posteriores.



Figura 31: Eliminador de CO<sub>2</sub>

### 3.1.3.3 Válvulas de paso

Se han instalado 3 válvulas de paso. Además, a la salida del digestor, tras el absorbedor de CO<sub>2</sub>, se ha instalado una T divisora que divide el circuito en dos ramas. Una de ellas va dirigida al depósito de recogida de gases, y la otra está dirigida hacia los sistemas auxiliares de medición (ORSAT, calorímetro, etc.) La situación y posición de las válvulas es la siguiente:

- Entre la T divisora y el depósito de recogida de gases. Normalmente abierta para que el gas se vaya almacenando en el depósito.
- A la salida del depósito de recogida de gases. Normalmente cerrada para evitar el escape al exterior. Cuando la presión en el depósito sea excesiva se abrirá esta válvula para evacuar gas al exterior. También se puede conectar esta salida a los sistemas auxiliares de medida si se quisiera.

- Entre la T divisora y los sistemas auxiliares de medida. Normalmente cerrada. Sólo se abrirá cuando e desee hacer medidas del gas producido. De nuevo, también se puede utilizar como medio de evacuación del gas al exterior si fuera necesario.

En este punto concluye lo referente a las partes del sistema de digestión propiamente dicho. A continuación se muestra la instrumentación y equipos auxiliares utilizados en distintos ámbitos de los experimentos realizados.

EL sistema completo se muestra a continuación:



Figura 32: Sistema completo



### 3.1.3.4 Gasómetro, ORSAT y Calorímetro

Se han utilizado los aparatos contruidos por Francisco Urieta Aguado para su proyecto final de carrera “Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás”. Para una mayor información sobre su construcción, elementos y calibración consultar el proyecto “Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás”.

Los instrumentos utilizados han sido los siguientes:

- Gasómetro y calorímetro:



Figura 33: Gasómetro y calorímetro

- ORSAT:

Aparato Orsat

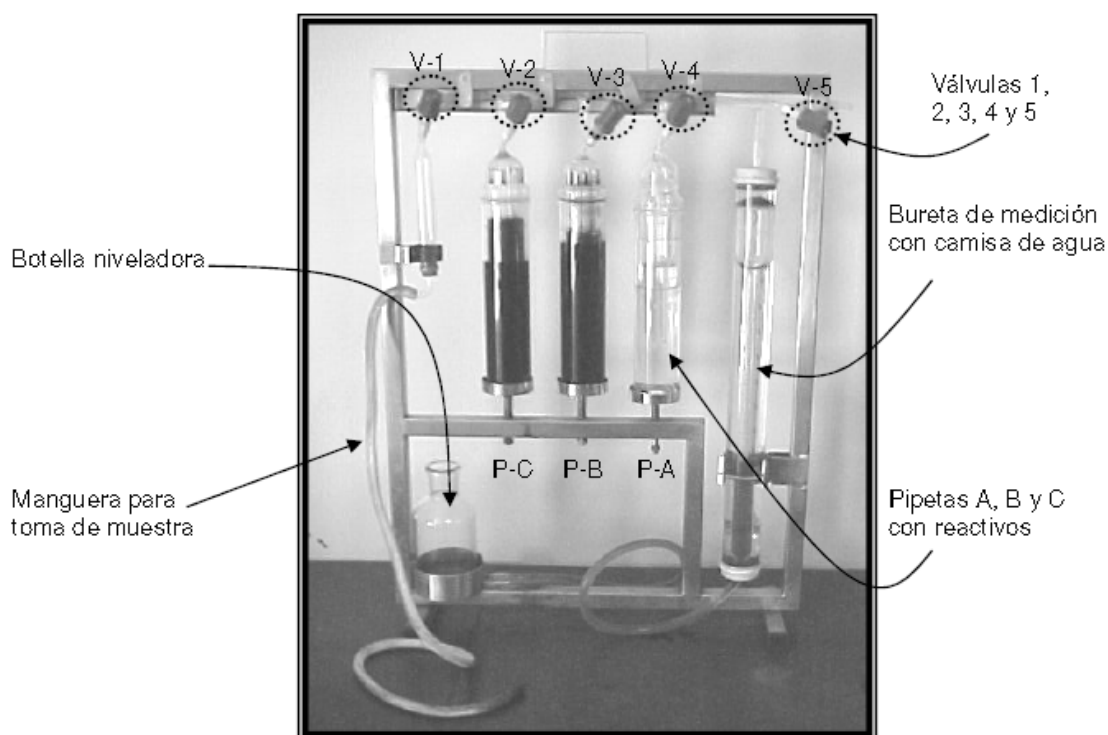


Figura 34: ORSAT

Posteriormente en el apartado de Resultados del experimento se profundizará en el uso de estos aparatos, basándonos siempre en la guía de uso llevada a cabo en el proyecto citado.

### 3.2 Instalaciones e instrumentación del laboratorio

Las distintas instalaciones e instrumentos utilizados a lo largo de la construcción y realización del experimento son las siguientes:

- Campana extractora

Su finalidad es, por un lado, evitar en la medida de lo posible los malos olores provenientes de la biomasa utilizada en los experimentos durante la manipulación de la misma en el llenado del digestor, recogida de muestra, etc.; y por otro lado como medida de seguridad ante posibles fugas accidentales del gas producido, ya que éste es combustible.

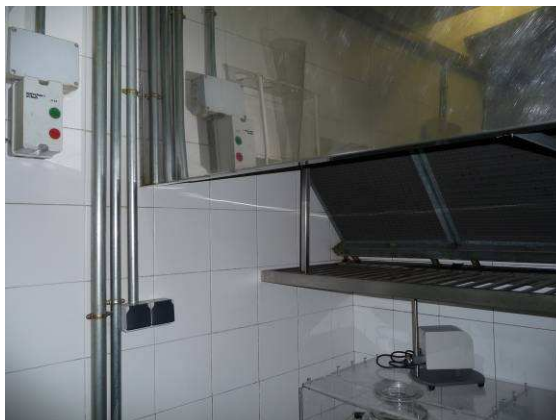


Figura 35: Campana

- Hornos

Utilizados para la determinación de los sólidos de la biomasa a analizar. Posteriormente se detallará el método de cálculo de estos sólidos.



Figura 36: Estufa de secado (arriba) y horno-mufla de calcinación (abajo)

- Balanza

Utilizada para la determinación de sólidos así como para otras posibles aplicaciones como pesado de la biomasa a introducir en el digestor, etc.



Figura 37: Balanza

- Campana enfriamiento

Utilizada en la determinación de sólidos para el enfriamiento de las muestras a su salida de los hornos.



Figura 38: Campana enfriamiento

- pH-Metro

Se utilizará para la medición diaria del pH de la biomasa en digestión. Posteriormente se detalla la frecuencia de medida y finalidad de la misma.



Figura 39: pH-metro

- Incubadora de muestras

Utilizada en el proceso de determinación de DQO, Fosfatos y Nitratos de la biomasa en digestión, posteriormente se explicará su funcionamiento.



Figura 40: Incubadora

- Fotómetro

Utilizada para la determinación final de DQO, Fosfatos y Nitratos de la biomasa en digestión, posteriormente se explicará su funcionamiento.



Figura 41: Fotómetro

## 4. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO: DIGESTIÓN DE ESTIERCOL VACUNO A DISTINTAS TEMPERATURAS

### 4.1 Discusión y análisis de resultados

Para este proyecto se realizaron tres ensayos de prueba para comprobar el correcto funcionamiento del biodigestor, así como para elaborar una guía para su correcto uso, recomendaciones y posibles mejoras en el mismo resultado de la experiencia obtenida.

En los tres ensayos el substrato utilizado fue el mismo, estiércol vacuno obtenido de una granja de Soto de Agües en el concejo de Sobreescobio (Principado de Asturias). Para mantener el substrato almacenado en buenas condiciones se mantuvo un bidón cerrado, guardado en nevera a 4°C, evitando así su deterioro.

A continuación se van a describir en distintos apartados todos los parámetros controlados durante los ensayos, su frecuencia y método para obtener los mismos, así como los resultados obtenidos en los ensayos y un análisis de los mismos.

Previamente al desarrollo profundo de la metodología de obtención de los parámetros, se muestra un resumen sencillo de los mismos y sus frecuencias de medida.

**Tabla resumen parámetros de control:**

Parámetros de control	
Substrato	
Parámetro	Frecuencia de medida
Sólidos	1-2 veces/semana
Mezcla digestor	
Parámetro	Frecuencia de medida
Temperatura mezcla	Diariamente
pH	Diariamente
DQO	1 vez/semana-15días
Fósforo	1 vez/semana-15días
Nitrógeno	1 vez/semana-15días
Gas producido	
Parámetro	Frecuencia de medida
Volumen producido	Diariamente
Composición biogás	1 vez/semana-15días
Calorimetría (PCI)	4 medidas
Otras	
Parámetro	Frecuencia de medida
Temperatura ambiente	Diariamente
Presión manométrica	Diariamente

Tabla 6: Parámetros de control

#### 4.2 Substrato de partida: Medición de sólidos

- Medición de sólidos:
  - Frecuencia: 1-2 veces/semana
  - Proceso:
    - Pesamos recipiente (1ª medida)
    - Llenamos recipiente y pesamos (2ª medida)
    - Calentar a 105°C (18h-24h)
    - Enfriar y pesar (3ª medida)
    - Calentar a 550°C (20min)
    - Enfriar y pesar (4ª medida)

a) Sólidos Totales (ST).- Consisten en la cantidad de materia que queda como residuo después de una evaporación entre los 103°C a 105° C.

Por tanto:

$$\text{Materia inicial} = 2^{\text{a}} \text{ medida} - 1^{\text{a}} \text{ medida}$$

$$\text{ST} = 3^{\text{a}} \text{ medida} - 1^{\text{a}} \text{ medida}$$



b) Sólidos Volátiles (SV).- Los sólidos Totales sometidos a calcinación a una temperatura de 550° C, transformándose la materia orgánica en CO<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>O. Esta pérdida de peso se interpreta en términos de materia orgánica volátil (SV), los sólidos que no volatilizan se denominan sólidos fijos (SF).

Por tanto:

$$SV = 3^{\text{a}} \text{ medida} - 4^{\text{a}} \text{ medida}$$

$$SF = 4^{\text{a}} \text{ medida} - 1^{\text{a}} \text{ medida}$$

$$ST = SF + SV$$

Esta medida tiene como finalidad determinar el volumen de agua que deberemos agregar a la biomasa a la hora de introducirla en el biodigestor. Para llevar a cabo este cálculo nos basaremos en la siguiente fórmula:

$$Sd = \text{Biomasa} + \text{Agua}$$

Donde “Sd” es la cantidad (en volumen) de la mezcla de biomasa y agua.

La cantidad total de sólidos orgánicos (no olvidemos que los residuos orgánicos constan de una fracción líquida y una sólida) contenidos deben bordear el 8% del total de sustrato para óptimos resultados en la fermentación. El cálculo se hará entonces, por regla de tres simple: Para 100 kg de sustrato (Sd) necesitamos 8 Kg de sólidos orgánicos, luego, para 1 kg de sólidos requerimos de (100/8) kg de sustrato.

La cantidad de sustrato (Sd) se obtendrá multiplicando la cantidad de biomasa por la cantidad porcentual de sólidos totales contenidos (TS) por la fracción (100 / 8).

Por ello, podemos utilizar esta fórmula para determinar la cantidad de agua que deberemos adicionar a nuestro sustrato, ya que conoceremos el valor del volumen de la mezcla que queremos introducir en el digestor, así como el porcentaje de sólidos totales, que se determinarán experimentalmente como ya se ha explicado.

Aquí podemos ver una tabla de valores guía de ST para distintos tipos de sustrato obtenida de Bangladesh Biogas Technology (Renewable Energy & Environmental in Formation Network - [www.reein.org](http://www.reein.org)), que nos servirá como referencia para comprobar nuestros resultados:

Table 1: The Total Solid Content of Common Fermentation Materials in Rural Areas (Approx.)

Materials	Dry matter content (%)	Water content (%)
Dry rice straw	83	17
Dry wheat straw	82	18
Corn stalks	80	20
Green grass	24	76
Human excrement	20	80
Pig excrement	18	82
Cattle excrement	17	83
Human Urine	0.4	99.6
Pig Urine	0.4	99.6
Cattle Urine	0.6	99.4

Tabla 7: Valores típicos ST





---

A continuación se muestra la tabla de datos de las 10 determinaciones que se realizaron para la biomasa utilizada en nuestro experimento, estiércol vacuno.



Medidas (g)				Sólidos calculados (g)				Porcentajes			
1ª	2ª	3ª	4ª	MI	ST	SV	SF	% Humedad	%ST	%SV	%SF
141,4377	202,8807	152,4382	143,1325	61,4430	11,0005	9,3057	1,6948	82,1	17,9	84,6	15,4
141,4210	201,1270	151,7176	144,0367	59,7060	10,2966	7,6809	2,6157	82,8	17,2	74,6	25,4
141,4053	208,2575	152,3281	143,3567	66,8522	10,9228	8,9714	1,9514	83,7	16,3	82,1	17,9
135,0053	204,7594	146,0237	136,9787	69,7541	11,0184	9,0450	1,9734	84,2	15,8	82,1	17,9
141,4217	195,9725	149,1894	142,9291	54,5508	7,7677	6,2603	1,5074	85,8	14,2	80,6	19,4
135,2135	180,0461	141,7627	136,2117	44,8326	6,5492	5,5510	0,9982	85,4	14,6	84,8	15,2
141,5423	194,8735	150,0125	142,8432	53,3312	8,4702	7,1693	1,3009	84,1	15,9	84,6	15,4
141,4243	206,2145	153,1032	142,5674	64,7902	11,6789	10,5358	1,1431	82,0	18,0	90,2	9,8
135,0053	204,6574	146,1227	136,8765	69,6521	11,1174	9,2462	1,8712	84,0	16,0	83,2	16,8
141,3561	207,9875	152,5311	143,2967	66,6314	11,1750	9,2344	1,9406	83,2	16,8	82,6	17,4
				Media:	10,8096	8,7508	2,0588	83,1790	16,8210	80,8536	19,1464
1ª Medida	Recipiente vacío			MI	Materia orgánica Inicial			%Humedad	Sobre la materia inicial total (MI)		
2ª Medida	Recipiente lleno			ST	Sólidos Totales			%ST	Sobre la materia inicial total (MI)		
3ª Medida	Rec. lleno tras eliminar humedad			SV	Sólidos Volátiles			%SV	Sobre los sólidos totales (ST)		
4ª Medida	Rec. lleno tras eliminar SV			SF	Sólidos Fijos			%SF	Sobre los sólidos totales (ST)		

Tabla 8: Contenido sólidos

A la vista de los resultados obtenidos, podemos comprobar que coinciden con los valores esperados (en torno a 17% de ST), y por tanto realizaremos el siguiente cálculo para determinar la cantidad de agua que deberemos agregar al sustrato para obtener nuestra mezcla:

En nuestro caso el volumen del digestor es de 5 litros. Normalmente se recomienda llenar el digestor un 75%-80%, dejando un 20%-25% libre, aproximadamente, por lo tanto se lleno el digestor con 4 litros de mezcla agua-sustrato. Por tanto, la cantidad de agua a agregar al sustrato será:

$$4kg = 100 \cdot \frac{0,17 \cdot M_{biomasa}}{8}$$

Donde el 0,17 es el valor promedio de sólidos totales determinado experimentalmente.

Por tanto:

$$M_{biomasa} = 1,8kg$$
$$M_{agua} = 4 - 1,8 = 2,2kg$$

De este modo hemos determinado el volumen de agua y de biomasa que conformarán la mezcla inicial de sustrato que introduciremos en el biodigestor.

Para todas las nuevas adiciones de mezcla que se realicen al biodigestor (recargas del mismo) nos basaremos en esta misma fórmula, variando simplemente el volumen de mezcla que queremos agregar.

Algo muy importante a tener en cuenta a la hora de realizar los ensayos en el biodigestor, es que a la hora de introducir la mezcla en el mismo, previamente deberemos conseguir que la mezcla sea lo más homogénea posible. Para ello se recomienda seguir los siguientes pasos:

- 1º) Triturar en la medida de lo posible la mezcla, en nuestro caso se utilizó una batidora doméstica, de tal forma que obtengamos una biomasa suficientemente homogénea
- 2º) Realizar un filtrado para eliminar cuerpos grandes que no hayan podido triturarse en el paso anterior.

Esto nos evitará problemas posteriores en el proceso de digestión como acumulación de sólidos en el fondo del digestor, lo que impide una digestión homogénea de la mezcla, así como problemas en la recogida de muestras debido al posible taponamiento de las salidas (grifo inferior).

En lo que se refiere a la recarga del digestor, nos basaremos en la literatura para decidir los tiempos de retención hidráulica (TRH) que representan el tiempo que el sustrato introducido deberá de permanecer en el reactor. Nos basaremos en la siguiente tabla:

Temperatura de Funcionamiento ° C	Tiempo de retención hidráulico, (días)	Tiempo de retención recomendado, (días)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

(Fuente: Metcalf y Eddy, 1998)

Tabla 9: TRH recomendados

Basándonos en esto, y teniendo en cuenta que nuestros experimentos se realizarán a 25°C, 30°C y 35°C, y que está programado que duren aproximadamente 30 días cada uno (excepto el Experimento 1, de 15 días), las recargas se harán del siguiente modo:

- 1º: Experimento 1, 25°C, 15 días de duración: No se hará recarga
- 2º: Recarga entre Experimento 1 y Experimento 2
- 3º: Experimento 2, 25°C, 30 días de duración: No se hará recarga
- 4º: Recarga entre Experimento 2 y Experimento 3
- 5º: Experimento 3, 30°C, 30 días de duración: recarga a los 15 días
- 6º: Recarga entre Experimento 3 y Experimento 4
- 7º: Experimento 3, 35°C, 30 días de duración: recarga a los 15 días

De esta manera se mantendrán aproximadamente los tiempos de retención hidráulica recomendados.

#### 4.3 Mezcla digestor: Temperatura

- Temperatura:  
Temperaturas de 25°C, 30°C y 35°C

Esta temperatura la mantenemos gracias al baño térmico, y por tanto, en caso de que variara demasiado, siempre podemos regularla alterando el valor de la temperatura del agua del baño. En nuestro caso, variaremos la temperatura en lo que dividiremos como Experimentos 1, 2, 3 y 4, que se realizaran de manera continua para evitar el tiempo inicial en el cual la producción de biogás es muy baja e irregular.

El primer experimento, “Experimento 1”, a 25°C, con una duración de 15 días, comenzará una vez la producción de biogás sea constante y tangible, ya que inicialmente, todo biodigestor requiere de un tiempo (que puede variar entre 2 horas y 90 días normalmente) hasta que la producción de biogás sea la óptima.

En este caso, el Experimento 1 comenzó aproximadamente 20 días después de que el biodigestor se rellenara por primera vez, y antes de empezar se volvió a rellenar pero dejando sin vaciar completamente el digestor.

El “Experimento 1” se realizó a 25 grados, con una duración de 15 días.

El “Experimento 2” se realizó a 25 grados, con una duración de 30 días.

El “Experimento 3” se realizó a 30 grados, con una duración de 30 días.

El “Experimento 4” se realizó a 35 grados, con una duración de 30 días.

#### 4.4 Mezcla digestor: pH

- pH:
  - Frecuencia: constantemente (cada día)
  - Proceso: medida a través de pH-Metro

Para medir el pH se utilizará el medidor “Orion Star Series Meter”, en concreto el medidor de mesa. La medición se realiza por medio de la utilización de un electrodo proporcionado por el fabricante.

Para realizar la medida se introduce el electrodo, previamente lavado, en nuestra muestra, y por medio de la lectura mostrada en el display del medidor obtenemos nuestra medida. Bastará con unos 5 ml de mezcla para realizar la medida

Además de la medida de pH, el pH-Metro también nos proporciona el valor de la conductividad de la mezcla, que también se anotó.

La medida del pH es necesaria para el control de la acidez-alcalinidad, ya que variaciones de los valores del mismo de más de un 10% de un día para otro, supondrían una inestabilidad del sistema, algo contraproducente para la digestión. Si se diera el caso, para mejorar el amortiguamiento de esta variable, deberíamos agregar compuestos como bicarbonato de sodio, para que el proceso continuara su curso de la manera óptima.

Además, como ya se citó en apartados anteriores, el valor del pH no deberá caer por debajo de 6,2, puesto que crea un medio tóxico para las bacterias metanogénicas e inhibe el proceso de digestión.



A continuación se muestran las tablas de datos con los distintos valores de pH, así como la temperatura de la mezcla y la conductividad.

El experimento 1, que duró solo 15 días y que se realizó a temperatura de 25°C como hemos explicado anteriormente, tuvo como objetivo simplemente comprobar el funcionamiento correcto de la instalación, detección de posibles fugas, puesta a punto, así como un primer acercamiento a la recogida de datos y metodología de los análisis de las muestras de substrato en digestión y gas producido.

Los resultados se exponen a continuación.



### Experimento 1: Tabla pH y Tª Ex1

Día	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	7,37	7,4	7,44	7,33	7,25	7,14	7,11	7,09
Tª (°C)	23	25	25	25	25	25	25	25
Conductividad (µS/cm)	480	478	476	474	471	469	469	469

Día	9	10	11	12	13	14	15
pH	7,07	7,04	7,02	7	6,97	6,95	6,95
Tª (°C)	25	27	27	27	28	28	28
Conductividad (µS/cm)	469	469	469	468	468	468	473

### Experimento 2: Tabla pH y Tª Ex2

Día	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	7,1	6,98	6,96	6,83	6,75	6,71	6,63	6,63
Tª (°C)	27	28	28,1	28	28,1	27,9	28	28
Conductividad (µS/cm)	478	478	476	474	473	473	473	473

Día	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	6,62	6,54	6,35	6,33	6,39	6,45	6,59	6,5
Tª (°C)	27,5	27	26	26	26	26,5	27	26
Conductividad (µS/cm)	473	473	470	473	473	473	475	476

Día	17	18	19	20	21	22	23	24
pH	6,43	6,4	6,37	6,37	6,35	6,29	6,26	6,2
Tª (°C)	26	26	26,5	26,5	27	27,5	27	26,5
Conductividad (µS/cm)	475	475	475	475	475	475	473	475

Día	25	26	27	28	29	30
pH	6,2	6,22	6,19	6,17	6,14	6,14
Tª (°C)	26	26,5	27	27	26	26,5
Conductividad (µS/cm)	475	473	473	473	473	473

### Experimento 3: Tabla pH y Tª Ex3

Día	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	6,31	6,28	6,23	6,26	6,26	6,32	6,37	6,31
Tª (°C)	28	29,5	29,6	29,5	29	30	29,5	29,5
Conductividad (µS/cm)	476	473	469	473	473	473	473	474

Día	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	6,21	6,34	6,44	6,56	6,57	6,63	6,62	6,83
Tª (°C)	29,5	30	30	30	29,5	29,5	30	30,5
Conductividad (µS/cm)	480	476	473	473	473	473	473	474

Día	17	18	19	20	21	22	23	24
pH	6,96	7,04	7,01	6,84	6,73	6,61	6,53	6,64
Tª (°C)	30,5	30,5	30,5	30,5	30	30,1	29,8	30
Conductividad (µS/cm)	471	473	473	476	476	474	473	474

Día	25	26	27	28	29	30
pH	6,74	6,88	7,01	6,95	7,12	7,19
Tª (°C)	30	30	29,8	30	29,8	30
Conductividad (µS/cm)	476	476	473	476	469	473



#### Experimento 4: Tabla pH y T<sup>a</sup> Ex4

Día	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	7,22	7,24	7,21	7,18	7,11	7,12	7,06	6,93
T <sup>a</sup> (°C)	35	34,8	34,9	35	35	35	35	35
Conductividad (μS/cm)	475	475	473	473	473	473	473	476

Día	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	6,85	6,71	6,77	6,69	6,57	6,54	6,57	6,72
T <sup>a</sup> (°C)	35,1	35	35	35	35	34,9	34,5	34,6
Conductividad (μS/cm)	478	478	476	474	473	473	473	473

Día	17	18	19	20	21	22	23	24
pH	6,84	7,02	7,03	7,14	7,12	7,11	7,14	7,12
T <sup>a</sup> (°C)	34,8	35	35	34,9	35	35	35	35
Conductividad (μS/cm)	473	470	473	473	473	475	473	469

Día	25	26	27	28	29	30
pH	7,11	7,08	7,01	6,91	6,84	6,99
T <sup>a</sup> (°C)	35,1	34,8	35	35	35	35
Conductividad (μS/cm)	473	473	473	473	476	474

Tablas 10, 11, 12 y 13: Tablas pH Experimentos 1, 2, 3 y 4

Las gráficas obtenidas a partir de los datos medidos son las siguientes:

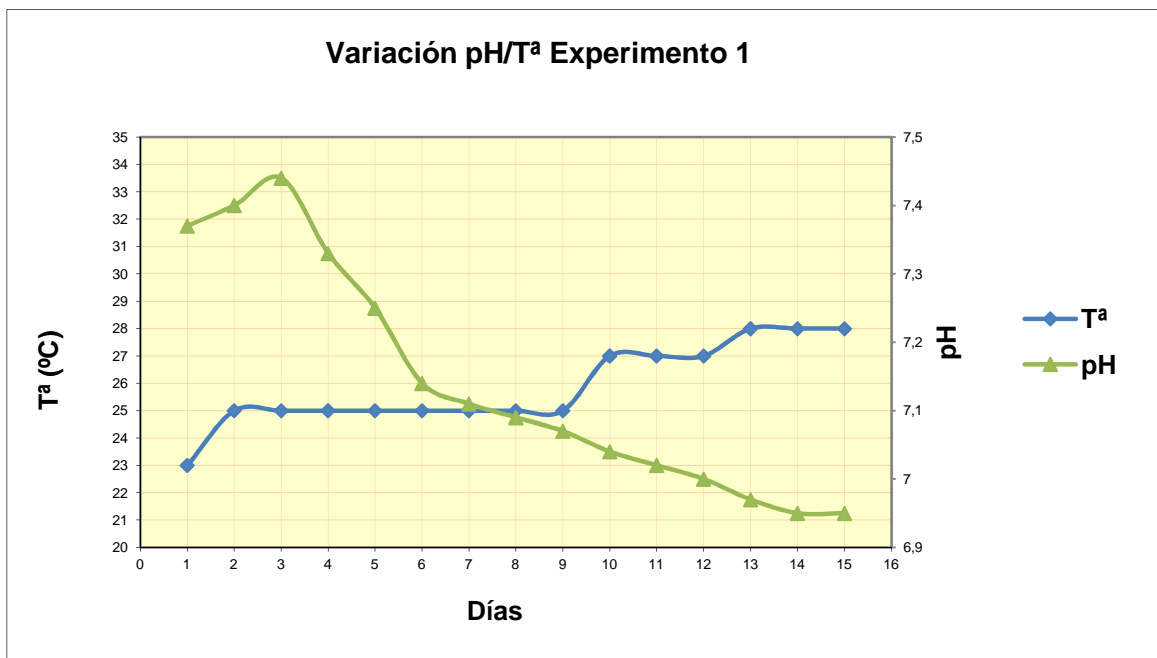


Figura 42: Variación pH/T<sup>a</sup> Ex1

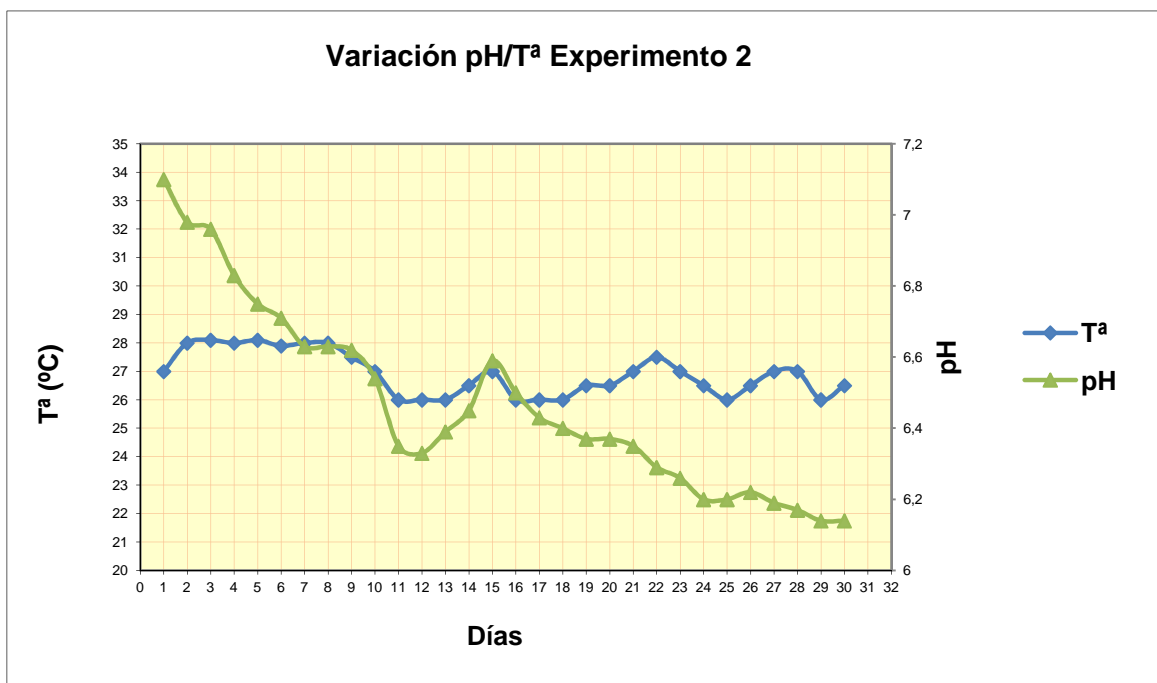


Figura 43: Variación pH/T<sup>a</sup> Ex2

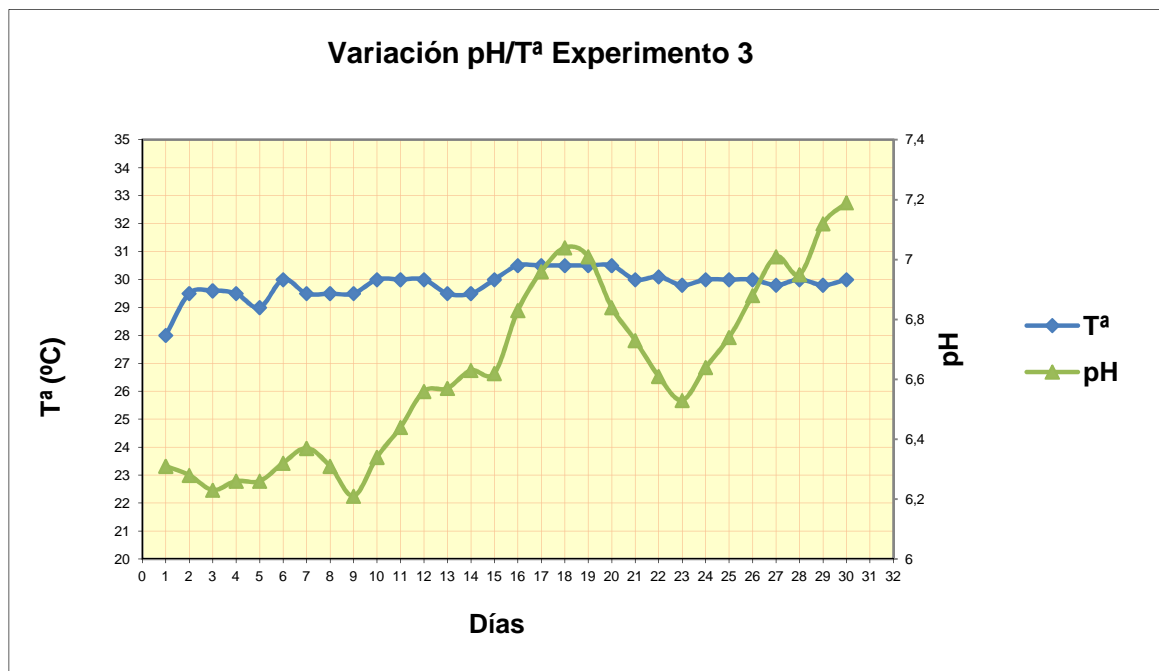


Figura 44: Variación pH/T<sup>a</sup> Ex3

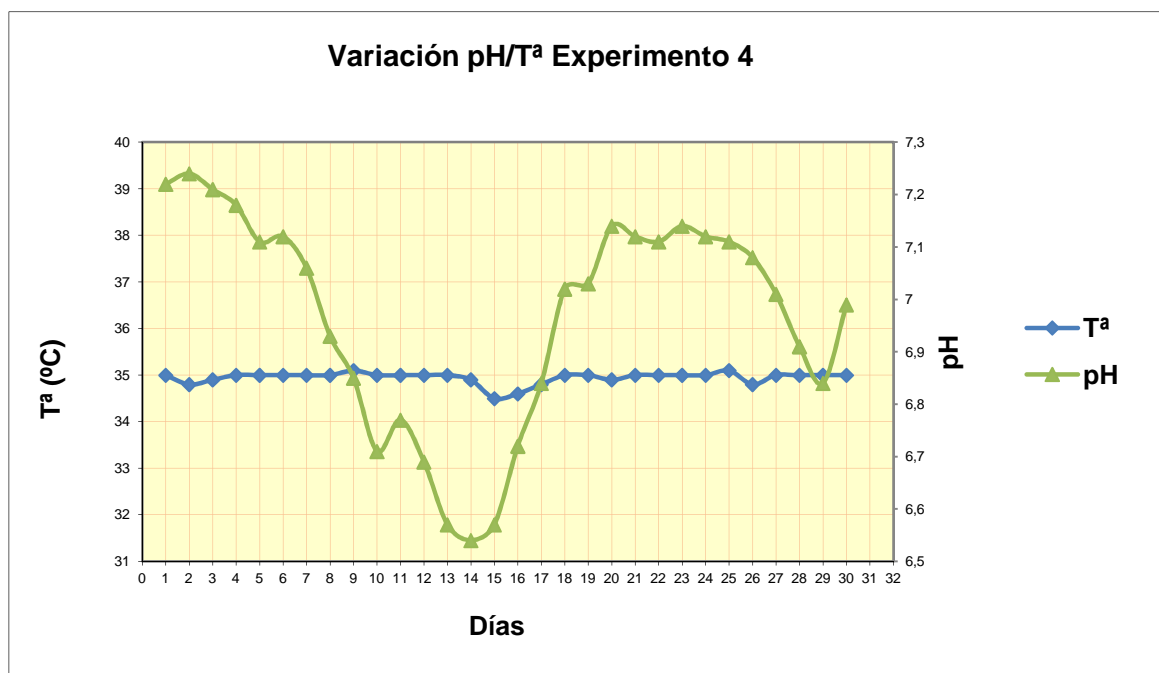


Figura 45: Variación pH/T<sup>a</sup> Ex4

### Análisis de resultados:

Como podemos observar, la temperatura, aunque variable, se ha mantenido siempre dentro de un rango óptimo, para los tres experimentos a 25°C, 30°C, y 35°C. Las pequeñas variaciones son debidas a la temperatura ambiente del laboratorio, pero no son influyentes en el desarrollo de la digestión ya que las variaciones son mínimas.

Respecto a su influencia en el pH, dados los resultados obtenidos se aprecia que la variación del mismo es independiente de la temperatura a la que trabajemos, por lo que su variación dependerá de otros factores y procesos internos de la digestión.

Los valores de pH obtenidos son los siguientes:

	pH Medio	Tmed
Ex1	7,14	25,87
Ex2	6,47	26,90
Ex3	6,63	29,84
Ex4	6,97	34,95

pH Máximo	7,44
pH Mínimo	6,14

Tabla 14: Valores pH obtenidos

Como podemos ver se han llegado a alcanzar valores de pH por debajo de 6,2, lo que impediría un desarrollo correcto de la digestión, pero estos valores solo se alcanzaron de manera muy puntual y rápidamente se volvió a los valores óptimos, por lo que no fue necesario agregar ningún tipo de sustancia tampón para estabilizar el pH.

En la siguiente gráfica resumen de todos los experimentos se puede ver claramente cómo el pH varía independientemente del valor de la temperatura:

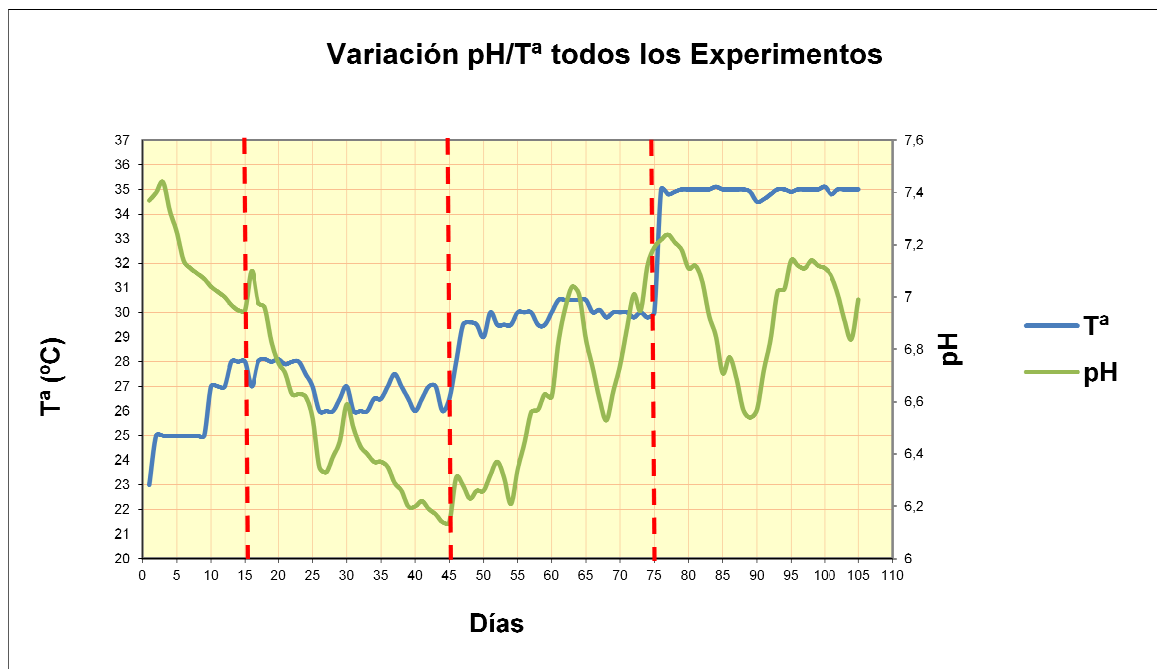


Figura 46: Variación pH/T<sup>a</sup> todos los experimentos

Nota: Las líneas discontinuas verticales separan los distintos periodos de experimentación.

Dado que en general los valores obtenidos entran dentro de los valores considerados como buenos para el desarrollo de una buena digestión anaerobia (en torno a 7, pH neutro), podemos concluir que para las tres temperaturas analizadas no existe, a priori, ningún problema en cuanto al pH se refiere, no siendo necesaria la adición de sustancias tampón para equilibrar el pH.

En la literatura se menciona que el principal problema que se presenta durante el arranque de un biodigestor anaerobio, es la acidificación de la mezcla, pero ya hemos visto que aunque durante los primeros 45 días el pH disminuyó, no se llegó a un nivel que se pueda considerar como problemático, por lo que en nuestro caso este problema no apareció.

Posteriormente analizaremos la influencia de los valores de pH en otros parámetros en los que sí se observa una correlación directa.

#### 4.5 Mezcla digestor: DQO

Tanto para la determinación de DQO como para las de Fósforo y Nitrógeno, se utilizará el fotómetro EcoSense 9500 Photometer, así como los preparados para la determinación LCK 514 (DQO), LCK 348 (Fósforo) y LCK 238 (Nitrógeno).

Respecto a la determinación por Espectrofotometría hay que decir que este método es aplicable a muestras limpias con bajo contenido de materia orgánica en las que las concentraciones se encuentren en torno a los 10 mg/l. Por tanto, y dado que nuestra muestra tiene un alto contenido en materia orgánica, para poder llevar a cabo las determinaciones deberemos, en primer lugar, realizar un filtrado de la misma para minimizar las interferencias ocasionadas por la presencia de materia orgánica no soluble, y en segundo lugar, diluir la muestra con agua destilada.

El fotómetro utilizado posee opciones para tener en cuenta esta dilución de la mezcla, para así obtener unos datos adecuados de los parámetros medidos.

- DQO:
  - Frecuencia: 1 vez/semana o 15 días
  - Proceso:

Instrucciones para la evaluación de DQO con el pack Hach-Lange LCK 514 (100-200 mg/l O<sub>2</sub>):

- 1) Agitar para que el sedimento quede en suspensión
- 2) Pipetear 2 ml de nuestra muestra con cuidado introduciéndola en la cubeta
- 3) Cerrar la cubeta y limpiar bien el exterior
- 4) Invertir la cubeta
- 5) Calentar en incubadora a 148°C durante 2 horas
- 6) Sacar la cubeta caliente e invertir cuidadosamente 2 veces
- 7) Enfriar a temperatura ambiente en gradilla de enfriamiento
- 8) Limpiar bien el exterior de la cubeta, esperar a que los sedimentos estén bien asentados y realizar la evaluación

#### Análisis de resultados:

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que representa indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente (DQO) la materia orgánica. Por tanto, al analizar el contenido de DQO del sustrato que estamos introduciendo en el digestor (que llamaremos influente) y la materia obtenida tras la digestión (efluente) podemos comprobar en qué medida se está eliminando la materia orgánica en nuestro digestor.

Por tanto, se realizaron medidas de este parámetro a lo largo de los diferentes experimentos, obteniendo los siguientes resultados. Se realizaron 2 medidas en momentos diferentes de cada experimento:

	Experimento 1		Experimento 2			
Medida (mg/l)	1	2	3	4	5	6
DQO influente	194	175	162	183	184	149
DQO efluente	75	82	58	67	61	63
Porcentaje eliminación	61,3%	53,1%	64,2%	63,4%	66,8%	57,7%

	Experimento 3				Experimento 4			
Medida (mg/l)	7	8	9	10	11	12	13	14
DQO influente	165	198	178	132	145	167	183	137
DQO efluente	74	63	50	48	42	58	52	44
Porcentaje eliminación	55,2%	68,2%	71,9%	63,6%	71,0%	65,3%	71,6%	67,9%

Tabla 15: DQO eficiencia remoción

A la vista de los resultados podemos ver en qué medida se ha eliminado la materia orgánica de nuestro influente, o lo que es lo mismo, la eficiencia de remoción de la DQO. Como podemos comprobar, los valores obtenidos son satisfactorios, obteniendo un promedio de eficiencia del 64,4%, alcanzando valores de hasta un 72% de eliminación de materia orgánica.

	Temperatura (°C)	Eficiencia remoción promedio
Experimento 1	25	57,2%
Experimento 2	25	63,0%
Experimento 3	30	64,7%
Experimento 4	35	68,9%

Tabla 16: Eficiencias de remoción promedio DQO

Observando los valores medios obtenidos para cada experimento, podemos observar como claramente la eficiencia de remoción ha mejorado en los experimentos realizados a mayor temperatura, obteniendo los mejores valores para el Experimento 4 a 35°C.

Con respecto al Experimento 1, era de esperar un peor valor de eficiencia dado que todavía no se había logrado una buena estabilización de la digestión, y como podremos comprobar en anteriores apartados, la producción de biogás en esta etapa es la más baja de todas. Esto se ve claramente al analizar los resultados del Experimento 2 que, desarrollándose a la misma temperatura de 25°C, obtiene un valor de eficiencia un 6% mayor.

Por lo tanto, podemos concluir que la eficiencia en la eliminación de materia orgánica más alta se produce para la temperatura más alta de 35°C, correspondiente al Experimento 4.

#### 4.6 Mezcla digestor: Fósforo y Nitrógeno

- Fósforo:
  - Frecuencia: 1 vez/semana o 15 días
  - Proceso: seguir instrucciones

Instrucciones para la evaluación de Fósforo con el pack Hach-Lange LCK 348 (0,5-5 mg/l PO<sub>4</sub>-P ortofosfatos y 1,5-15 mg/l PO<sub>4</sub> fósforo total):

- 1) Quitar cuidadosamente el cierre de seguridad del tapón roscado de la cubeta dosificadora
- 2) Desenroscar el tapón de la cubeta
- 3) Pipetear 0,5 ml de la muestra a analizar
- 4) Enroscar el tapón de la cubeta
- 5) Agitar bien para un correcto mezclado
- 6) Calentar en el termostato 60 min a 100°C/
- 7) Dejar enfriar y después pipetear 0,2ml del Reagent B.
- 8) Introducir una Dosicap C gris en la cubeta





9) Dar la vuelta varias veces. Después de 10 minutos, volver a dar la vuelta varias veces y después evaluar.

- Nitrógeno:
  - Frecuencia: 1 vez/semana o 15 días
  - Proceso: seguir instrucciones

Instrucciones para la evaluación de Nitrógeno con el pack Hach-Lange LCK 238 (5-40 mg/l  $\text{TN}_p$  Nitrógeno total):

1) Uno tras otro dosificar ininterrumpidamente en un tubo de reacción seco:

- 0,5 ml de nuestra muestra
- 2 ml de solución A
- 1 pastilla B

Cerrar inmediatamente y no dar la vuelta al tubo.

2) Calentar directamente a 100°C durante 60 min

3) Enfriar y añadir 1 MicroCap C

4) Cerrar el tubo de reacción e invertir varias veces hasta que el liofilizado se haya eliminado totalmente del MicroCap C sin dejar resto alguno

5) Pipetear lentamente en la cubeta-test 0,5 ml de la muestra preparada

6) Pipetear lentamente 0,2 ml de la solución D. Cerrar inmediatamente la cubeta e invertir varias veces hasta que no quede ningún resto (hasta la disolución completa)

7) Transcurridos 15 min limpiar bien el exterior de la cubeta y realizar la evaluación

#### Análisis de resultados:

En lo que respecta al P y N, es importante analizar en qué medida estamos eliminando el contenido de los mismos, debido a que, en el caso de que el material ya digerido en el biodigestor, se vierta a ecosistemas en peligro de eutrofización, es importante eliminar los nutrientes P y N para no aumentar la intensidad de ese proceso.

Por ello analizó el contenido de P y N de manera análoga al estudio realizado para la DQO, obteniendo los resultados expuestos a continuación:

Eficiencia remoción	Ortofosfatos ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )	Fósforo total ( $\text{PO}_4$ )	Nitrógeno total (TNb)
Experimento 1	44%	42%	54%
Experimento 2	50%	48%	65%
Experimento 3	57%	57%	68%
Experimento 4	65%	66%	76%

Tabla 17: Eficiencia remoción P y N

Al observar los resultados vemos claramente que la eficiencia de remoción aumenta con la temperatura, obteniendo los mejores resultados en el experimento realizado a 35°C. De todas formas, los resultados obtenidos para el resto de experimentos son adecuados, y entran dentro de los valores esperados obtenidos de la documentación.

#### 4.7 Gas: Volumen de gas producido

- Volumen de gas producido:

En este caso, para realizar esta medida tenemos dos posibilidades:

- Utilizar el depósito de almacenamiento, calculando el volumen de gas producido por medio de la medida de agua desplazada del siguiente modo:

Se realiza un marca de la altura del agua en el bidón antes de que se produzca el comienzo de la digestión y por tanto la producción de biogás.

Una vez comience a producirse gas y comience a llenarse el depósito de almacenamiento, este gas irá empujando el agua, haciendo que esta ascienda por el tubo de PVC preparado para ello. De este modo, y conociendo las medidas del depósito, podremos determinar por la altura de agua desplazada, el volumen de gas que se ha producido, y la presión manométrica a la que se encuentra.

Esta medida la realizaremos a diario, pudiendo así determinar el volumen de gas producido día a día.

- Utilizar el gasómetro proporcionado en el proyecto de Francisco Urieta Aguado, "Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás".

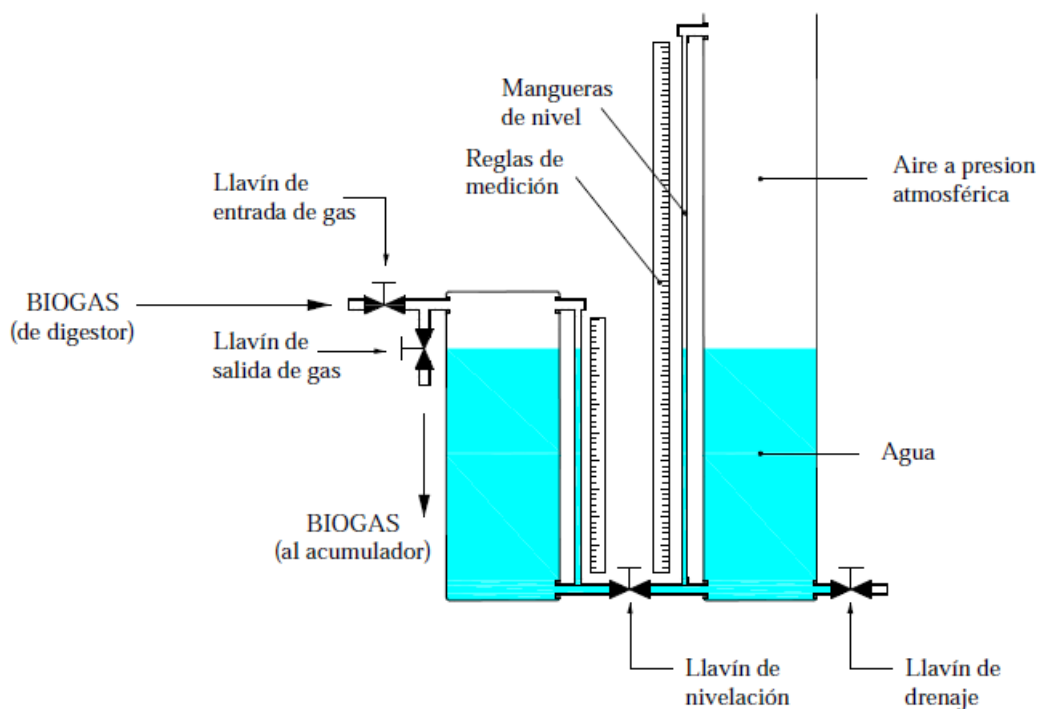


Figura 47: Tubos para almacenamiento de biogás.

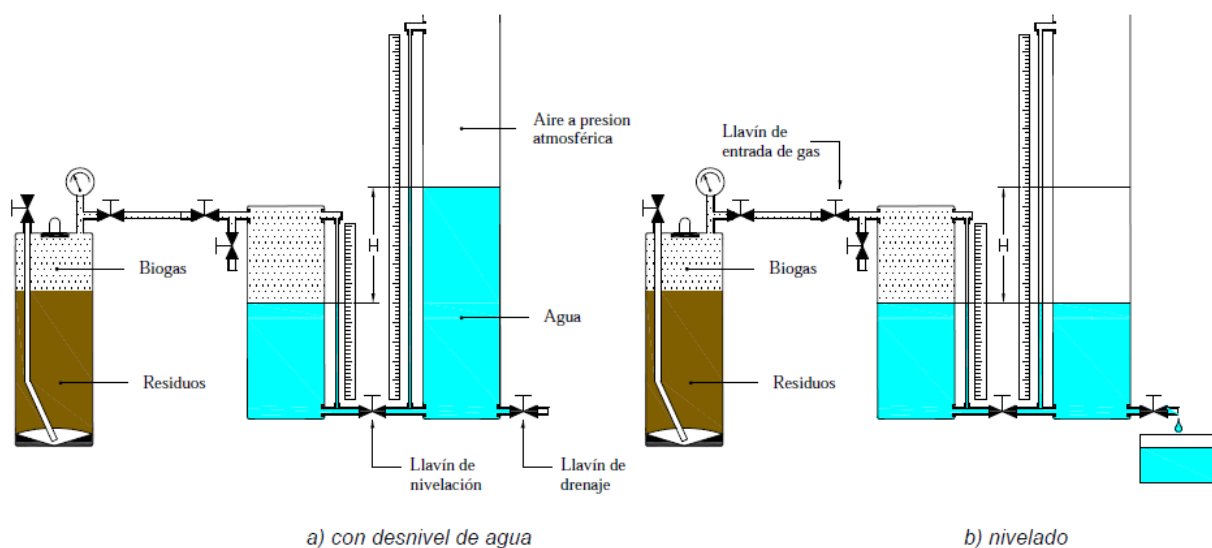


Figura 48: Operaciones con el gasómetro.

Dentro de las recomendaciones proporcionadas en la guía de uso del gasómetro, encontramos las siguientes indicaciones:

“Hay que tomar las siguientes precauciones:

- Prestar especial atención a las posibles fugas de gas en su proceso de construcción.
- Aplicar silicona o masilla selladora en todas las uniones.

- Pasado un tiempo considerable (20-30 min) se empiezan a notar fugas en el sistema.
- Sistema barato y sencillo de implementar.
- Proceso de calibración lento.
- Una vez obtenida la ecuación del ajuste el procedimiento de medida será más rápido.”

Como podemos observar, uno de los apartados nos indica que pasado un tiempo de unos 20-30 minutos comienza a haber fugas. Dado que nuestro sistema está constantemente produciendo biogás durante días, no sería recomendable utilizar este aparato para el almacenaje del gas y para la medida de volumen producido del mismo. Lo utilizaremos en todo caso como medio de almacenaje del gas previamente al análisis del mismo en el ORSAT y el calorímetro.

Por tanto, para el almacenaje y medida del volumen producido utilizaremos el depósito construido para ello, teniendo siempre como opción disponible el uso del gasómetro.

A continuación se presentan las tablas de volumen de gas específico obtenidas en cada experimento. También se han añadido las gráficas correspondientes a los valores de volumen específico y pH de la mezcla, para poder así realizar un análisis sobre la relación de estos dos parámetros.



Día	25	26	27	28	29	30
pH	6,2	6,22	6,19	6,17	6,14	6,14
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Conductividad (μS/cm)	475	473	473	473	473	473

**Experimento 3:** Tabla Volumen específico gas producido Ex3

Día	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	6,31	6,28	6,23	6,26	6,26	6,32	6,37	6,31
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,08
Conductividad (μS/cm)	476	473	469	473	473	473	473	474

Día	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	6,21	6,34	6,44	6,56	6,57	6,63	6,62	6,83
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,07	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12	0,14	0,23
Conductividad (μS/cm)	480	476	473	473	473	473	473	474

Día	17	18	19	20	21	22	23	24
pH	6,96	7,04	7,01	6,84	6,73	6,61	6,53	6,64
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,23	0,24	0,23	0,19	0,18	0,17	0,17	0,18
Conductividad (μS/cm)	471	473	473	476	476	474	473	474

Día	25	26	27	28	29	30
pH	6,74	6,88	7,01	6,95	7,12	7,19
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,18	0,19	0,19	0,22	0,22	0,21
Conductividad (μS/cm)	476	476	473	476	469	473

#### Experimento 4: Tabla Volumen específico gas producido Ex4

Día	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	7,22	7,24	7,21	7,18	7,11	7,12	7,06	6,93
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,24	0,24	0,25	0,25	0,27	0,26	0,22	0,21
Conductividad (μS/cm)	475	475	473	473	473	473	473	476

Día	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	6,85	6,71	6,77	6,69	6,57	6,54	6,57	6,72
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,21	0,21	0,18	0,19	0,17	0,15	0,15	0,16
Conductividad (μS/cm)	478	478	476	474	473	473	473	473

Día	17	18	19	20	21	22	23	24
pH	6,84	7,02	7,03	7,14	7,12	7,11	7,14	7,12
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,18	0,18	0,19	0,2	0,2	0,22	0,24	0,25
Conductividad (μS/cm)	473	470	473	473	473	475	473	469

Día	25	26	27	28	29	30
pH	7,11	7,08	7,01	6,91	6,84	6,99
Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	0,27	0,28	0,27	0,25	0,24	0,24
Conductividad (μS/cm)	473	473	473	473	476	474

Tablas 18, 19, 20 y 21: Tablas V específico Experimentos 1, 2, 3 y 4



Las gráficas obtenidas a partir de los datos medidos son las siguientes:

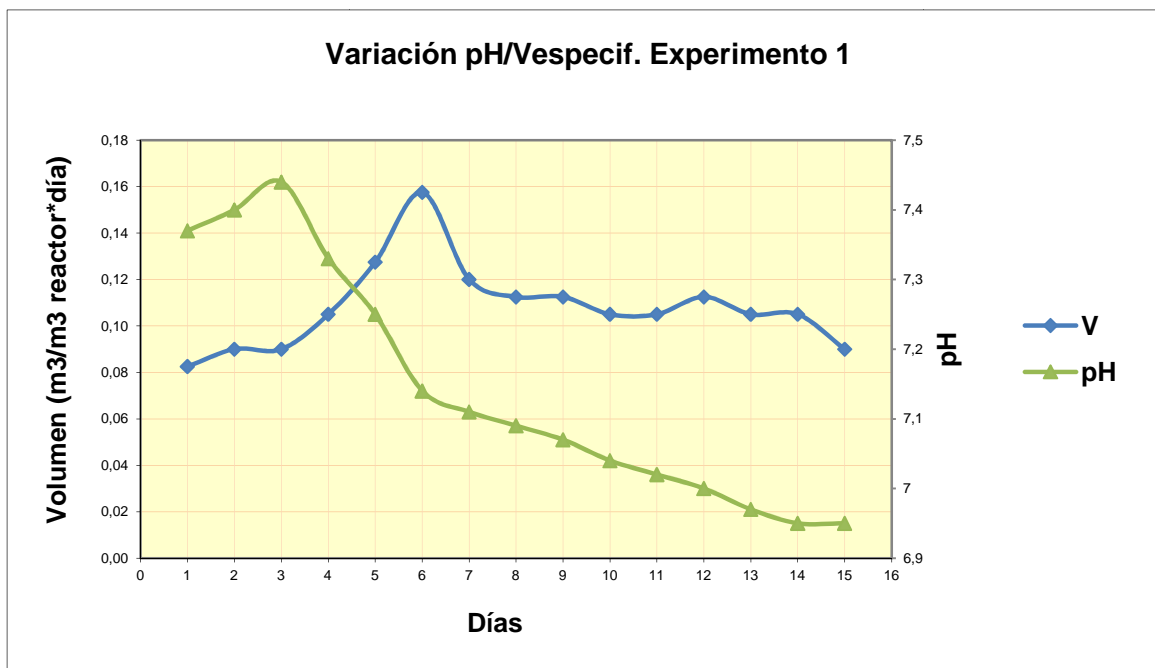


Figura 49: Variación pH/V Ex1

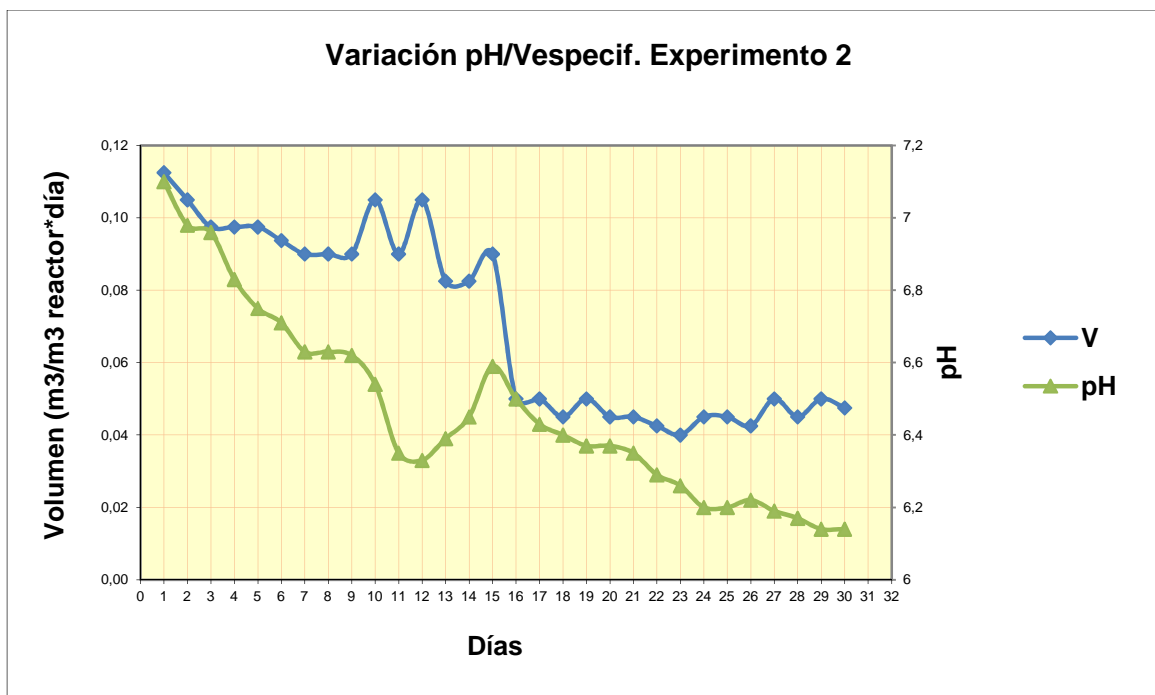


Figura 50: Variación pH/V Ex2

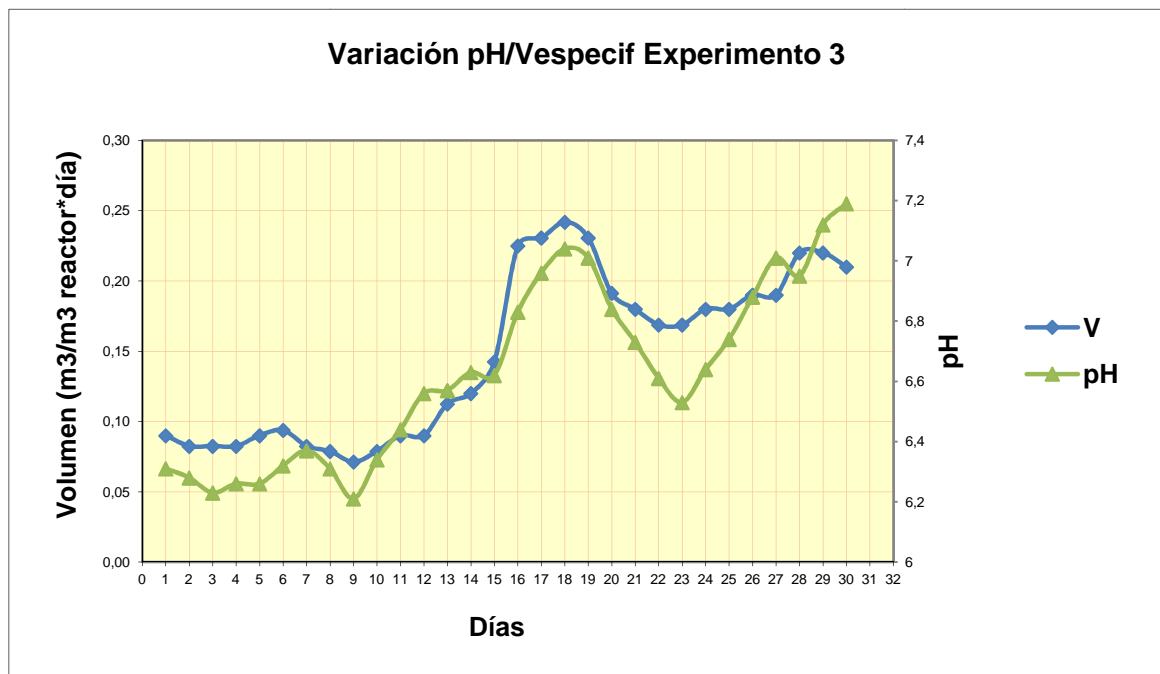


Figura 51: Variación pH/V Ex3

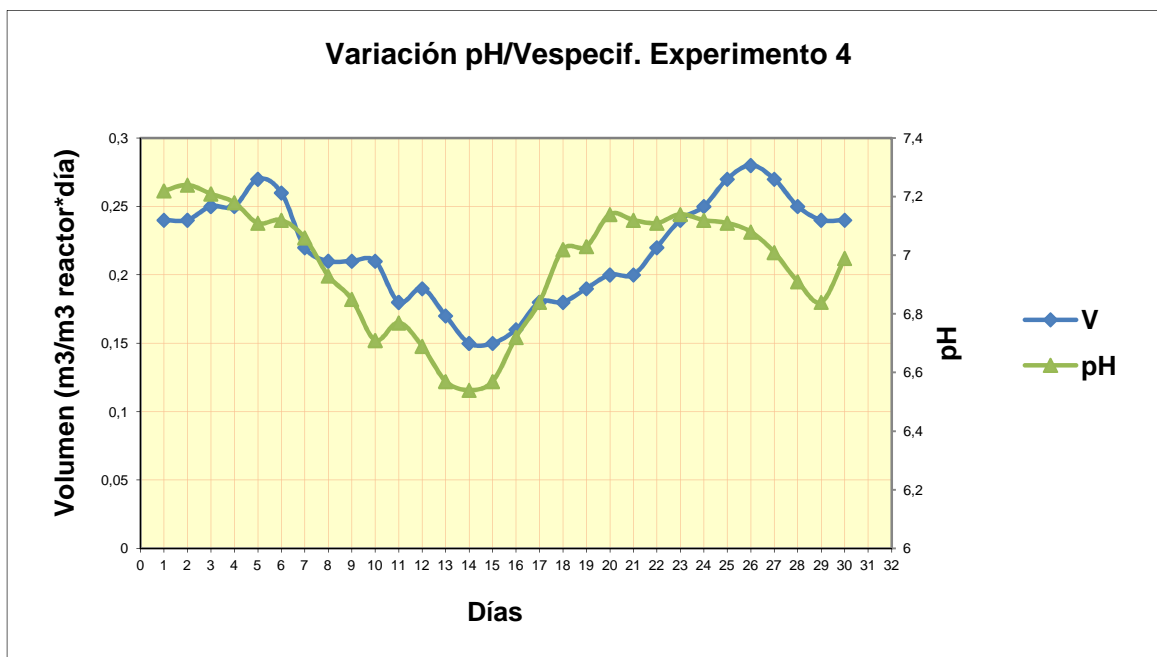


Figura 52: Variación pH/V Ex4

### Análisis de resultados:

El resumen de los resultados obtenidos es el siguiente:

	pH Medio	V <sub>espec</sub> medio
Ex1	7,14	0,11
Ex2	6,47	0,07
Ex3	6,43	0,15
Ex4	6,97	0,22

Tabla 22: Resumen Valores Volumen específico gas producido

En primer lugar, en lo que respecta a los valores de gas producido en relación a la temperatura de los experimentos, se observa claramente que el volumen tiende a aumentar cuando la temperatura aumenta. Es decir, a mayor temperatura, mayor producción de gas.

En la siguiente gráfica podemos observar claramente como los valores medios de volumen específico obtenidos en cada experimento han ido aumentando junto a la temperatura:

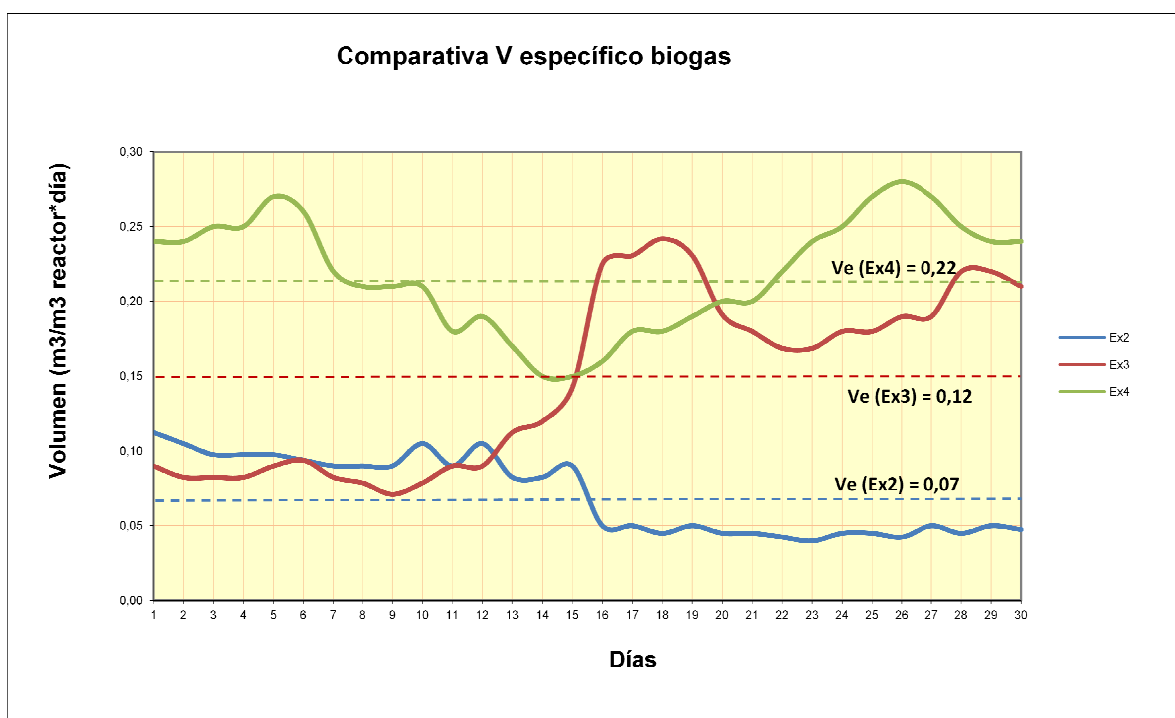


Figura 53: Valores medios de volumen específico del gas producido

En segundo lugar, analizaremos la relación existente entre el volumen de gas producido y los valores de pH de la mezcla. Para hacernos una idea de la variación de estos dos parámetros analizaremos la siguiente gráfica:

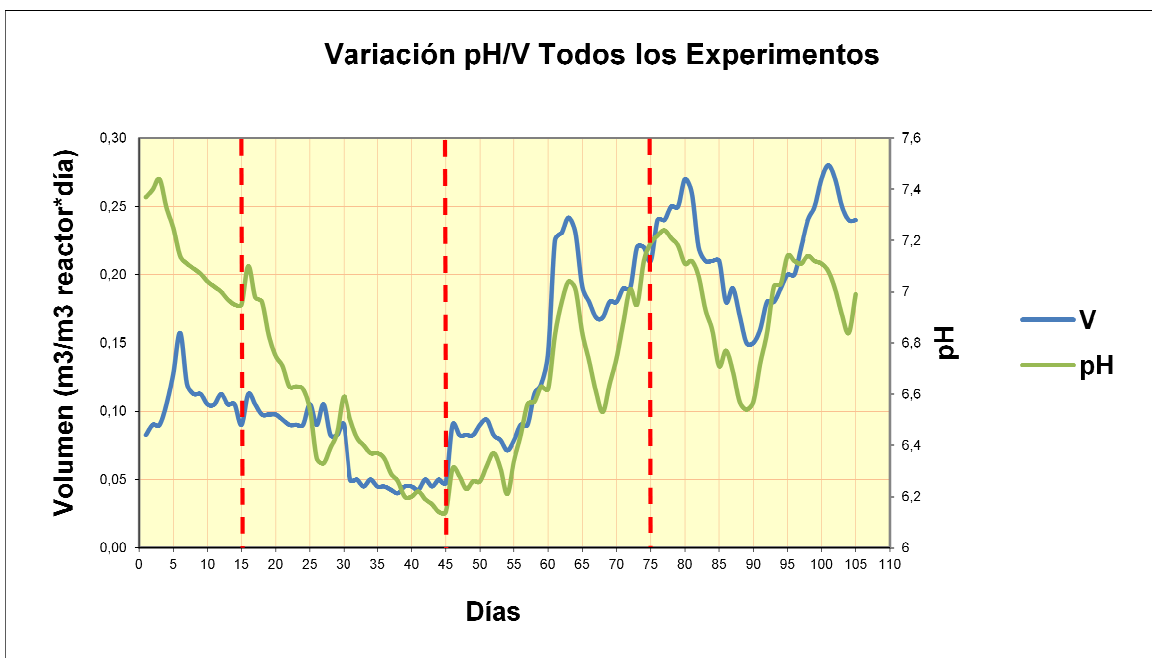


Figura 54: Relación pH/Volumen gas producido

Al observar esta gráfica se puede sacar una conclusión evidente; por lo general el valor del pH y el volumen de gas producido están íntimamente relacionados. Podemos observar como la producción de gas aumenta cuando nos acercamos a valores de pH cercanos al pH neutro ( $\text{pH}=7$ ), y disminuye según nos acercamos a valores del pH más ácidos.

En las gráficas individuales de cada experimento observamos que los picos de producción siempre se producen para valores de pH cercanos a 7, mientras que éstos van disminuyendo cuanto más nos alejamos de este valor y nos acercamos a valores de pH de 6.

Por tanto, será interesante siempre que busquemos aumentar la producción de gas llevar un control exhaustivo del pH de la mezcla, intentando que los valores de éste se mantengan siempre en torno a 7. Esto resulta ciertamente coherente en tanto en cuanto como ya se ha citado en la parte teórica introductoria así como en otros apartados, un pH neutro favorecerá el desarrollo de las bacterias metanogénicas, y por tanto una digestión óptima del sustrato y una producción adecuada de biogás.

Por tanto, las conclusiones son:

- La producción de gas aumenta con la temperatura.
- La producción de gas aumenta cuando la mezcla presente valores de pH cercanos a 7, disminuyendo la producción al acidificarse la misma.

#### 4.8 Gas: Composición del biogás

- Frecuencia: 1 vez/semana o 15 días
- Proceso: seguir instrucciones aparato ORSAT (incluidas a continuación)

Para determinar la composición del biogás producido en el digestor haremos uso del aparato ORSAT del proyecto de Francisco Urieta Aguado, "Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás". A continuación se expone brevemente la utilización del mismo para la determinación de la composición del biogás:

*"Procedimiento para la utilización del aparato ORSAT:*

- a) Una vez llenado el frasco de la pipeta (PA), se toma un nivel de referencia haciendo pasar el reactivo al nivel superior del frasco colocando un indicador de papel.*
- b) Para poder llevar a cabo esta operación, con todas las válvulas cerradas, se abre la válvula V5. Se eleva la botella niveladora, para hacer que el líquido de cierre ingrese en la bureta de medición y desplace el aire, repitiendo este proceso por 5 veces. En el último desplazamiento se cierra V5 y se abre V4, descendiendo lentamente ahora la botella niveladora se hace subir el reactivo absorbente hasta el nivel superior del recipiente (marcar este nivel), y por último cerrar la válvula V4 de nuevo.*
- c) Se procede de igual modo para hacer subir los reactivos absorbentes de los recipientes PB y PC.*
- d) Una vez hecho todo lo anterior, se hace ascender el líquido de cierre en la bureta y se puede tomar la muestra de gas. Se abre V1, descendiendo la botella para forzar a la muestra a entrar en la bureta por la manguera para toma de muestras; cerrando V1 y abriendo V5 se expulsa ahora este gas elevando la botella niveladora. Se repite este proceso también unas cinco veces para asegurar que la bureta y los capilares estén llenos de una muestra homogénea del gas que se quiere medir.*
- e) La última vez se ingresa el gas en la bureta de medición hasta que marque algo más de 100 ml de volumen. Ahora se estrangula la manguera de la botella con una pinza, se abre y cierra la válvula V5, quitando la pinza e igualando los niveles de líquido en la bureta y la botella se verifica que la lectura sea 100 ml. Por tanto, ahora se tiene una muestra definitiva de 100 ml de gases a temperatura ambiente y presión atmosférica, pudiendo leer directamente porcentajes.*
- f) Para absorber los componentes de la muestra de gas ( $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ ) se eleva la botella ejerciendo una ligera presión sobre la muestra, abriendo la válvula correspondiente (V2, V3 o V4) para comunicar los gases con el reactivo y subiendo la botella para forzar los gases a entrar en la pipeta del reactivo; se hace regresar la muestra a la bureta bajando la botella y llevando el reactivo al nivel de referencia marcado y se repite el proceso dos o tres veces. La última vez que regresa la muestra a la bureta se cierra la válvula de acceso rápidamente.*

- g) Para determinar la cantidad de componente absorbido ( $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ ) se iguala el nivel del líquido de la botella con el de la bureta. Como la presión dentro de la bureta se iguala con la atmosférica, se determina el volumen absorbido leyendo en la escala de la bureta medidora directamente la cantidad de gas que desapareció (por diferencia de volúmenes).*
- h) Repetir el procedimiento anterior con el resto de reactivos hasta que no se detecte cambio de volumen. Esto indicará que se absorbieron todos los componentes del gas excepto el nitrógeno  $\text{N}_2$  y otros componentes como el vapor de agua  $\text{H}_2\text{O}$  que como ya se explicó no se consideran en la medida sino que se adicionan al valor de nitrógeno todos ellos.”*

Como podemos ver, a partir del aparato ORSAT podemos obtener los porcentajes de  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ , ya que, como se indica en el último apartado, estos son los componentes que se absorben en cada botella. El resto de componentes, como puedan ser el  $\text{N}_2$ , vapor de agua, o en nuestro caso, el metano  $\text{CH}_4$ , se determinarán simplemente restando los porcentajes determinados de manera directa.

Debemos tener en cuenta varios aspectos concretos de nuestro experimento:

En primer lugar, en principio no debería aparecer monóxido de carbono  $\text{CO}$  en nuestro gas, ya que éste suele ser un gas producido en combustión, por lo que no debería aparecer en nuestros experimentos. Aún así, y como comprobaremos a la vista de los resultados, dado que la determinación de la composición por medio del ORSAT es algo imprecisa y complicada, veremos que obtenemos un pequeño porcentaje de  $\text{CO}$ , que realmente deberemos despreciar.

En segundo lugar, hay que tener en cuenta que a la salida del biodigestor hay instalado un eliminador de  $\text{CO}_2$ , ya explicado anteriormente. Esto hará que el porcentaje de  $\text{CO}_2$  determinado en el biogás analizado sea más bajo de lo que cabría esperar, dado que, como sabemos a partir de la documentación, en el biogás se pueden encontrar porcentajes de hasta el 40%-60% de  $\text{CO}_2$ . Pero también hay que tener en cuenta que al eliminar el  $\text{CO}_2$ , también estamos reduciendo en parte el volumen de gas producido (que medimos después del eliminador de  $\text{CO}_2$ ), pero mejorando su calidad (es decir, su porcentaje de  $\text{CH}_4$ )

Por último, supondremos que no se produce ni vapor de agua ni  $\text{N}_2$ , por lo que todo lo que queda tras la determinación de los porcentajes de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  sería  $\text{CH}_4$ . Realmente esto no es del todo cierto, pero para hacer una determinación más exacta deberíamos hacer un análisis más preciso, como podría ser una cromatografía del biogás.

Por tanto:

A continuación presentamos una tabla con los valores obtenidos:

	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3		Experimento 4	
Medida	1	2	3	4	5	6	7	8
Día	4	10	22	39	55	71	85	104
%CH <sub>4</sub>	39	54	72	75	75	77	77	74
%CO <sub>2</sub>	36	30	25	22	23	20	21	24
%O <sub>2</sub>	24	15	2	2	1	2	1	1
%CO	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 23: Composición biogás

Las determinaciones se realizaron aproximadamente una vez cada 15 días (en la tabla aparecen indicados los días en los cuales se realizaron las determinaciones), excepto para el primer experimento, que al durar solo 15 días, se realizaron dos determinaciones, haciendo una a la semana. La gráfica de seguimiento se representa a continuación:

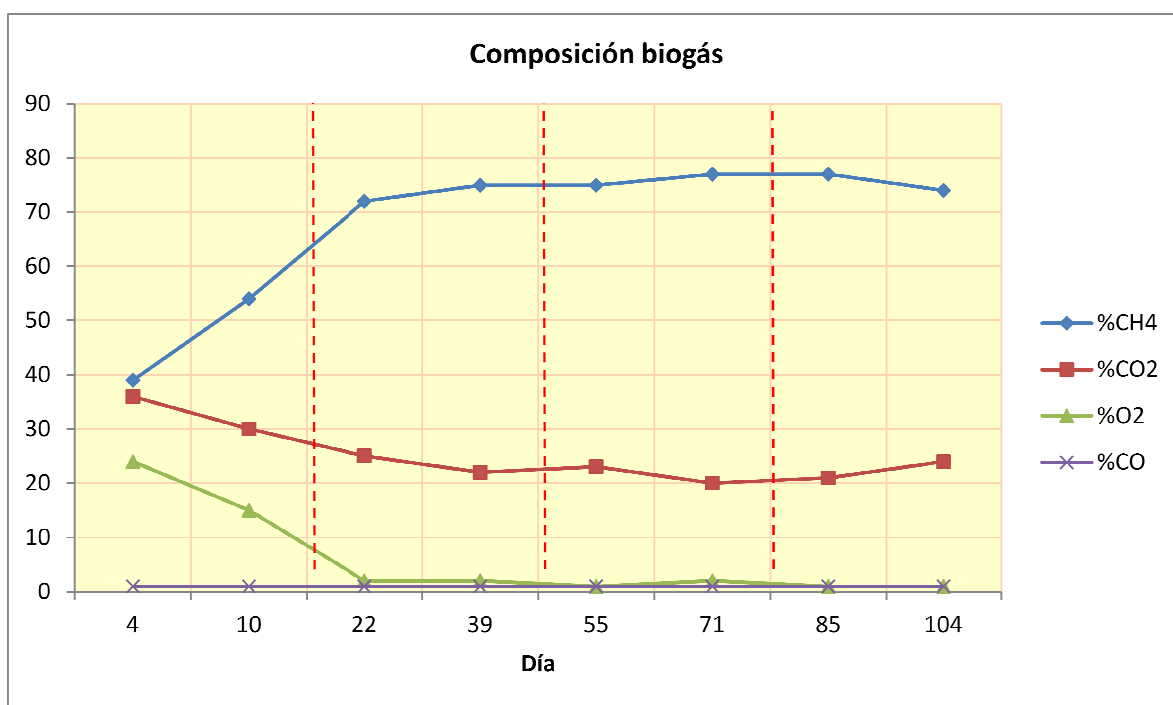


Figura 55: Composición biogás

#### Análisis de resultados:

En cuanto a los resultados obtenidos cabe destacar:

- Hay que tener en cuenta que, aunque tengamos instalado un eliminador de CO<sub>2</sub>, éste no va a ser totalmente eficiente, ya que aunque se utiliza un difusor para que se produzca burbujeo favoreciendo la eliminación del gas, ésta no será nunca completa y siempre obtendremos CO<sub>2</sub> en el biogás final.



- En el primer experimento, observamos que al principio existe un porcentaje alto de  $O_2$ , algo que es de esperar dado que al principio el depósito tiene aire atmosférico en su interior, y por lo tanto oxígeno, que se deberá consumir hasta conseguir un medio anaerobio. Por ello en los primeros días encontramos ese porcentaje de oxígeno que decae hasta prácticamente desaparecer pasados unos 12-15 días. Además también se observa que el porcentaje de metano es bastante bajo y muy similar al de  $CO_2$ .
- En el segundo experimento, y a partir de éste, ya observamos cómo el oxígeno ha desaparecido totalmente, aunque siempre obtendremos un porcentaje mínimo (del 1%-2%). También se observa que la cantidad de metano aumenta con el paso de los días.
- Uno de los motivos por el cual casi siempre encontraremos algo de oxígeno, es que al recargar el digestor tenemos que abrir uno de los orificios de la tapa, y aunque se haga lo más rápido posible, siempre se introducirá una pequeña cantidad de aire exterior.
- A partir del tercer experimento, y continuando en el cuarto, vemos que se produce una estabilización en los porcentajes de los componentes del biogás, y además el porcentaje de  $CH_4$  producido es bastante alto, por lo que la calidad del biogás es buena.

Por tanto, el valor máximo se obtuvo para las temperaturas de  $30^{\circ}C$  y  $35^{\circ}C$ , 77% de  $CH_4$ , obteniendo unos valores promedios finales de 67,875 de  $CH_4$ , 25,125 de  $CO_2$ , 6% de  $O_2$  y 1% de  $CO$  (los porcentajes de  $O_2$  y  $CO$  se podrían considerar despreciables), lo que resulta ser una calidad del biogás bastante buena, aunque siempre deberemos tener en cuenta que se está eliminando un porcentaje de  $CO_2$  en el eliminador.

Además podemos concluir que la composición del biogás se estabiliza y el porcentaje de  $CH_4$  aumenta con el paso de los días y el aumento de la temperatura de digestión.

#### 4.9 Gas: Calorimetría

En este apartado analizaremos la calidad del gas producido en lo referente a su poder calorífico. A la hora de realizar el estudio, se hizo uso del calorímetro construido por Francisco Urieta Aguado para su proyecto final de carrera "Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás". Parte de la información proporcionada en este apartado se obtuvo del citado proyecto.

En primer lugar deberemos tener en cuenta una serie de conceptos teóricos:

**Calor específico "c" ( $J/g \cdot ^{\circ}C$ )** de una sustancia es la cantidad de calor que se requiere para elevar un grado Celsius la temperatura de un gramo de la sustancia.

**Capacidad calorífica "C" ( $J/^{\circ}C$ )** de una sustancia es la cantidad de calor que se requiere para elevar un grado Celsius la temperatura de una determinada cantidad de la sustancia.

Ambas se relacionan en la siguiente expresión, donde “m” (g) es la masa:

$$C = mc$$

Si se conoce el calor específico y la cantidad de la sustancia, entonces el cambio en la temperatura de la muestra ( $\Delta T = t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}$ ) indicará la cantidad de calor “q” (J) que se ha absorbido o liberado en un proceso en particular.

$$q = mc\Delta T$$

En nuestro caso, para determinar el poder calorífico, nos basaremos en el que denominaremos “Método alternativo de Junkers”. Citando al proyecto “Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás”, tenemos que:

*“Junkers mide el poder calorífico de un gas incógnita en condiciones de presión constante; y el concepto es muy sencillo, ya que se trata de un intercambiador de calor en el cual se quema el gas y un flujo de agua en contracorriente refrigera el circuito (absorbe el calor); además se miden temperaturas y caudales en distintos puntos. Es difícil de conseguir y de fabricar, además es muy caro llegar al objetivo que se quiere. Por tanto se propone una alternativa sencilla de implementar y barata, pero por contra la precisión alcanzada no es demasiada.*

*El método consiste en quemar en condiciones idénticas de presión y temperatura un volumen conocido de biogás (del cual no conocemos su poder calorífico) y un mismo volumen de un gas cuyo poder calorífico se conoce. Estos volúmenes se quemaran uno detrás de otro para calentar una cantidad de 250 ml o 500 ml de agua, y con los datos obtenidos de las dos variaciones de temperatura respectivas, las masas de ambos gases, y el poder calorífico del gas conocido, se determinará el poder calorífico del biogás (esto es posible, ya que al ser condiciones muy similares las que existen en ambas combustiones, como presión, temperaturas, posición relativa de cada equipo, entonces los rendimientos serán aproximadamente iguales). Por encima de la columna de presión manométrica actúa la presión atmosférica sobre la superficie libre del agua. Este método es operativamente sencillo y los resultados finales en este método de presión variable en el quemado de gas no diferirán mucho de los resultados con respecto a presión constante.”*

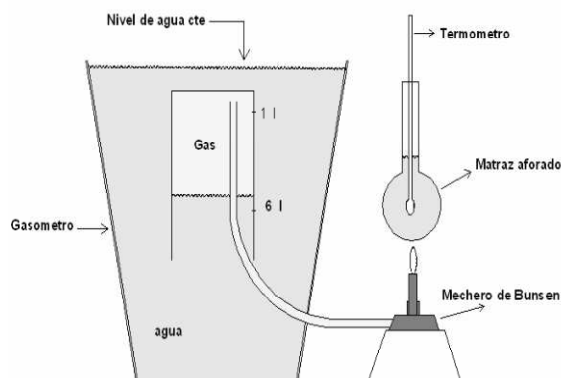


Figura 56: Alternativa al calorímetro de Junkers con gasómetro de campana flotante

Los cálculos serán sencillos, tal y como se muestra a continuación se procedería una vez realizados sendos experimentos y obtenidos los datos correspondientes necesarios:

Para el gas de capacidad calorífica conocida:

El calor que genera este gas al quemarse estará dado por la expresión siguiente:

$$Q_c = \frac{PCI_c M_c}{\rho_c}$$

Por otra parte, el calor recibido por el agua será:

$$Q_{ac} = mc\Delta T$$

Por tanto, el rendimiento de esta combustión será el calor que recibe el agua entre el que desprende el gas al quemarse, ya que el resto son pérdidas al ambiente, al matraz, etc.

$$\eta = \frac{Q_{ac}}{Q_c}$$

Para un biogás:

$$Q_{ab} = mc\Delta T$$

El calor entregado por el biogás despejando sería:

$$Q_b = \frac{Q_{ab}}{\eta}$$

Por último, de la primera ecuación despejaríamos nuestra incógnita:

$$Q_b = \frac{PCI_b M_b}{\rho_b} \rightarrow PCI_b = \frac{Q_b \rho_b}{M_b}$$

En principio el valor del poder calorífico del biogás entregado por este método es aceptable pero ligeramente alto.”

Una vez visto el método de cálculo, procedemos a realizar el análisis para nuestro caso.

Los datos que utilizaremos son los siguientes:

- Masa de agua:  $m_{agua} = 0,5 \text{ l}$
- Calor específico del agua:  $c_{agua} = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$
- Masa de biogás: para que el rendimiento del calorímetro sea lo mayor posible, se recomienda que la masa de gas quemado sea de aproximadamente 5 gramos, y que la distancia al quemador sea de 2 cm. Por tanto:

$$m_{biogás} = 5 \text{ g}$$

- Densidad del biogás: en este caso se ha tomado como valor de referencia la densidad del metano, aunque el biogás obtenido no sea exclusivamente metano, por lo que el valor obtenido no será del todo exacto, pero sí aproximado:

$$\rho_{\text{biogás}} = 0,717 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Rendimiento de combustión del calorímetro: como ya se ha dicho anteriormente, el rendimiento máximo se obtuvo en función de la distancia del mechero de Bunsen con respecto al matraz, obteniendo el máximo valor para una distancia de 2 cm. Por tanto, utilizaremos éste valor de rendimiento (por supuesto se mantuvieron los 2 cm de distancia a la hora de realizar los análisis)

$$\eta = 0,391$$

- Incremento de temperatura: se realizaron 4 pruebas para obtener el poder calorífico del biogás, con sus correspondientes temperaturas. Las medidas se realizaron durante el periodo de experimentación de los experimentos 3 y 4, ya que fue en este periodo en el cual se obtuvo un biogás de mayor calidad (en lo que respecta a composición del biogás) y los resultados fueron:

Medida	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)
1	26	52	26
2	27	58	31
3	26	53	27
4	26	57	31

Tabla 24: Valores temperaturas calorimetría

Por tanto, utilizando los datos expuestos, los poderes caloríficos fueron obtenidos con la siguiente fórmula:

$$PCI_{\text{biogás}} = \frac{m_{\text{agua}} \cdot c_{\text{agua}} \cdot \Delta T \cdot \rho_{\text{biogás}}}{\eta_{\text{agua}} \cdot m_{\text{biogás}}}$$

Obteniendo los siguientes valores para cada una de las 4 medidas realizadas:

Medida	PCI (kcal/m <sup>3</sup> )
1	4767,828
2	5684,718
3	4951,206
4	5684,718

Tabla 25: Poder calorífico biogás

#### Análisis de resultados:

Según la literatura, los valores típicos para el poder calorífico del biogás se encuentran en el entorno de 4000-6000 kcal/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, los resultados calculados en nuestros experimentos se encuentran dentro de este rango, siendo además unos valores muy positivos. El valor medio de PCI obtenido es de 5272,11 kcal/m<sup>3</sup>, que es un valor muy bueno. Pero hay que tener en cuenta una serie de hechos que no podemos obviar:

- El rendimiento de combustión que estamos tomando (0,391) es el valor de rendimiento máximo obtenido para el calorímetro. Por tanto, aunque se hayan mantenido las condiciones en las que se alcanza este rendimiento a la hora de realizar nuestro análisis, esto no nos asegura que el rendimiento real haya sido ese, pudiendo tener realmente un rendimiento menor, lo que reduciría los valores de PCI obtenidos.
- La densidad tomada para el biogás fue la densidad del metano, y dado que nuestro biogás no es exactamente metano en su totalidad (un 67,875% de CH<sub>4</sub> valor promedio), los valores de PCI obtenidos no serán exactos, aunque sí aproximados.

Con todo, y aún teniendo en cuenta estas consideraciones, los valores reales de PCI se encontrarían dentro de los 4000-6000 kcal/m<sup>3</sup> esperadas, valores típicos de PCI para un biogás, por lo que podemos considerar que los resultados han sido satisfactorios.

#### 4.10 Otras medidas

- Temperatura ambiente laboratorio:  
Se realizará con un termómetro digital sencillo.
- Presión manométrica en sistema recogida del gas:  
Se realizará por medio del manómetro construido para ello, situado en el sistema de recogida de gases ya descrito con anterioridad, y su objetivo será controlar que la presión en el depósito de recogida no sea excesiva y por ello peligrosa. Si llegará a darse el caso, simplemente abriremos la válvula que permite la salida de gases al exterior.  
En este caso, en los experimentos realizados nunca se llegó a esta situación dado que cada cierto tiempo se realizaban análisis del gas producido, extrayéndolo por tanto del depósito, y evitando así que se produjera un aumento de presión.  
Sólo deberemos tener cuidado con esto si el digestor permaneciera en funcionamiento durante muchos días sin que se vaciara el depósito.

### 5. DESARROLLOS FUTUROS Y APLICACIONES

En este apartado vamos a citar una serie de posibles experimentos que se podrían llevar a cabo en el futuro en el biodigestor anaerobio construido, sirviendo así para posibles nuevos proyectos, realización de prácticas u otros estudios que se quieran realizar.

Las posibles ideas para experimentos futuros son las siguientes:

- Estudio de la digestión a distintas temperaturas: de manera análoga al experimento llevado a cabo en este proyecto, se pueden realizar distintos experimentos variando las temperaturas en valores diferentes a los analizados aquí ( $T^a > 35^{\circ}\text{C}$ ) estudiando así la influencia de las mismas en los parámetros de control, y cantidad y calidad del biogás obtenido.
- Estudio de la digestión variando los tiempos de retención hidráulica: en este caso existe una amplia variedad de posibilidades, pudiendo realizar experimentos en los que los tiempos de retención sean más cortos o más largos, variando o no la cantidad de substrato que recargamos, y estudiando así la

influencia de todo ello en los parámetros de control, cantidad y calidad del biogás.

- Estudio de la optimización en la digestión de un substrato concreto: centrándonos en un tipo de residuo (animal o vegetal) podemos analizar las condiciones óptimas de digestión para el mismo, variando los valores de temperatura de digestión, tiempos de retención u otros parámetros, obteniendo así los mejores valores para la digestión del residuo analizado.
- Estudio comparativo de la digestión de diferentes substratos: en este campo existen infinitas posibilidades, pudiendo realizar estudios con todo tipo de residuos orgánicos, tanto vegetales como animales, y comparando así los resultados obtenidos con cada substrato.

Estos estudios comentados son simplemente 4 posibles ejemplos de aplicaciones futuras del biodigestor de laboratorio, existiendo muchas otras posibilidades así como posibles variaciones o combinaciones de estos mismos estudios. Sirva esto como posibles ideas para desarrollos futuros.

## 6. CONCLUSIONES

A lo largo del proyecto se han expuesto diferentes aspectos en lo que respecta a un biodigestor anaerobio de laboratorio, como han sido:

- Una introducción teórica en la que se han explicado los ciclos de la materia, los mecanismos fundamentales de la digestión anaerobia así como sus diferentes fases, procesos bacteriológicos y otros aspectos importantes.

También en este apartado teórico se han explicado los distintos parámetros que influyen en la digestión anaerobia, sus valores habituales, rangos óptimos, y mecanismos inhibidores o potenciadores del proceso de digestión.

Finalmente se explicaron los distintos tipos de reactores anaerobios que podemos encontrar actualmente a tamaño industrial actualmente.

- En segundo lugar se realizó una explicación teórica de cómo debería ser un biodigestor anaerobio discontinuo de laboratorio, tanto realizando recomendaciones sobre su construcción, como su funcionamiento y parámetros de control que se deben tener en cuenta para este tipo de digestores.
- En tercer lugar, pasando ya al nivel práctico, se elaboró una explicación detallada de la construcción del digestor anaerobio diseñado para este proyecto.

En este apartado se explicó cómo se realizó la construcción del digestor, así como todas las partes de las que consta el mismo, realizando recomendaciones prácticas aprendiendo de los errores cometidos o fallos encontrados a lo largo de la construcción del mismo, sirviendo de este modo de guía para futuras construcciones de sistemas similares o para la adición de posibles mejoras del propio sistema construido.

También se incidió aquí en los distintos aparatos, medidores y equipos auxiliares que se utilizaron para el desarrollo de los experimentos que se realizaron en el sistema.

- Finalmente, se expone detalladamente todo el desarrollo del experimento realizado, consistente en la realización de un análisis de la producción de biogás a partir de estiércol vacuno, aplicando en el mismo distintas temperaturas, para así analizar la influencia de las mismas sobre los distintos parámetros de control de la digestión, así como sobre la calidad y cantidad del biogás producido.

También se analizaron parámetros como la DQO, P y N, para poder así determinar la eficacia en la eliminación de la materia orgánica del sustrato introducido.

Este experimento es uno de tantos que se pueden llegar a realizar con el biodigestor de laboratorio, y que sirve así de guía para la realización de experimentos posteriores similares al realizado.

Por otro lado, como conclusiones del experimento se han encontrado distintos parámetros que influyen claramente en el desarrollo de la digestión, y que servirán como parámetros de control para experimentos posteriores, ya sean similares al realizado, o para otro tipo de experimentos como los citados en el apartado de aplicaciones (Apartado 5).

## 6.1 Construcción

En el apartado referente a la construcción de nuestro biodigestor anaerobio de laboratorio (Apartado 3), se ha explicado ampliamente y con detalle todas las diferentes partes del sistema, recomendaciones en la construcción e instrumentación auxiliar para el desarrollo de los experimentos. Por tanto, y como conclusiones, simplemente citaremos las recomendaciones y consejos más importantes para la construcción del digestor, así como posibles mejoras:

- Es muy importante construir una base estructural firme y resistente que sostenga el reactor, dado que, una vez lleno, su peso es considerable. Además, dado que tenemos un agitador funcionando en determinados momentos, éste siempre nos va a provocar una ligera vibración que no va a contribuir a la estabilidad del sistema completo.
- En los que respecta al citado sistema de agitación, éste resulta muy importante para el desarrollo de una digestión lo más homogénea posible, ya que evita la acumulación de materia orgánica en determinadas zonas, lo que no favorece la digestión.

En este aspecto se ha de decir que uno de los posibles puntos a mejorar en el biodigestor es la varilla de agitación, ya que se observó que se producía cierta acumulación de materia en el fondo del reactor, algo que se podría solucionar construyendo una varilla de agitación con palas que barrieran esa zona.

- Se recomienda utilizar un difusor en el sistema de absorción de CO<sub>2</sub>, a que así se aumenta el área de intercambio del gas con la disolución, mejorando la eliminación del citado gas. A la vista de los resultados en la composición del biogás final, y comparando los valores con los obtenidos de la literatura, se ha observado que la eliminación producida ha estado en torno a un 20%-25% del CO<sub>2</sub> (valores habituales en torno al 40%-50% de CO<sub>2</sub> en el biogás final, mientras que los obtenidos han estado en torno al 25%), por lo que la inclusión del difusor ha sido satisfactoria.



- En referencia al sistema de recogida de gases, válvulas de paso, salidas del digestor (tapa), sistema de absorción de CO<sub>2</sub>, conexiones con sistemas auxiliares (ORSAT, calorímetro, etc.), en definitiva el sistema completo, es muy importante realizar un sellado efectivo de todas las juntas, para evitar así fugas de gas en las mismas, lo que haría que los resultados obtenidos no fueran del todo correctos.

En este caso se optó por un sellado con teflón y masilla, con el cual se han obtenido buenos resultados.

## 6.2 Experimento

En lo que respecta al desarrollo del experimento, en el apartado correspondiente (Apartado 4) se han expuesto detalladamente los pasos a seguir, desarrollo del experimento, parámetros de control y recomendaciones prácticas a la hora de realizar el mismo. Por tanto, no incidiremos más en estos aspectos y nos centraremos en las conclusiones más importantes que se han obtenido:

### Factores que influyen en la degradación de la materia orgánica en un digestor anaerobio:

Como ya se ha comentado, uno de los aspectos más importantes, y objetivo de la realización del experimento, era encontrar la correlación existente entre la temperatura de digestión y la calidad y cantidad del biogás producido. De este modo exponemos a continuación las conclusiones obtenidas gracias al experimento, así como otro factor fundamental de influencia en el proceso de digestión: el pH:

- **Temperatura**

Es el principal factor que influye en la eficiencia de los digestores anaerobios. Para que un digestor anaerobio trabaje adecuadamente es necesario mantener una temperatura óptima entre 30-37 °C lo que implica un gasto por la incorporación de energía. La que, en nuestro caso, se suministra a través de un baño térmico. Cuando el digestor no se encuentra dentro del intervalo de temperatura, es necesario aumentar el tiempo de retención hidráulico, de tal manera que logren desarrollarse las tres etapas que permiten la depuración eficiente de la materia orgánica.

Con los resultados obtenidos en nuestros tres experimentos podemos comprobar este hecho:

	Tº (°C)	V <sub>espec</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor*día)	V <sub>espec masa</sub> (m <sup>3</sup> /kg estiercol*día)	V <sub>total</sub> (l/día)
Ex1	25	0,11	0,30	0,54
Ex2	25	0,07	0,20	0,35
Ex3	30	0,15	0,41	0,74
Ex4	35	0,22	0,61	1,10

Tabla 26: Resultados finales T<sup>a</sup>- Volumen biogás producido

La producción de biogás, en ausencia de inhibidores, aumenta con la temperatura, puesto que aumenta la tasa de multiplicación bacteriana. Temperaturas más bajas implican tiempos de retención más largos.

En nuestro caso, se mantuvieron unos tiempos de retención de unos 20 días para los Experimentos 1 y 2 (25°C) y de unos 15 días para los Experimentos 3 y 4 (30°C y 35°C respectivamente).

- pH

El pH en los digestores anaerobios se relaciona con la actividad realizada por las bacterias, encontrándose normalmente entre valores de 6-8, con un valor próximo a 7 para la actividad óptima.

Los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación. Las razones de esto parecen ser que el pH afecta a la actividad enzimática de los microorganismos, mediante:

- Cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como el carboxil y amino
- Alteración de los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo el sustrato
- Desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas.

Para que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3.

Analizando los resultados obtenidos podemos corroborar lo citado:

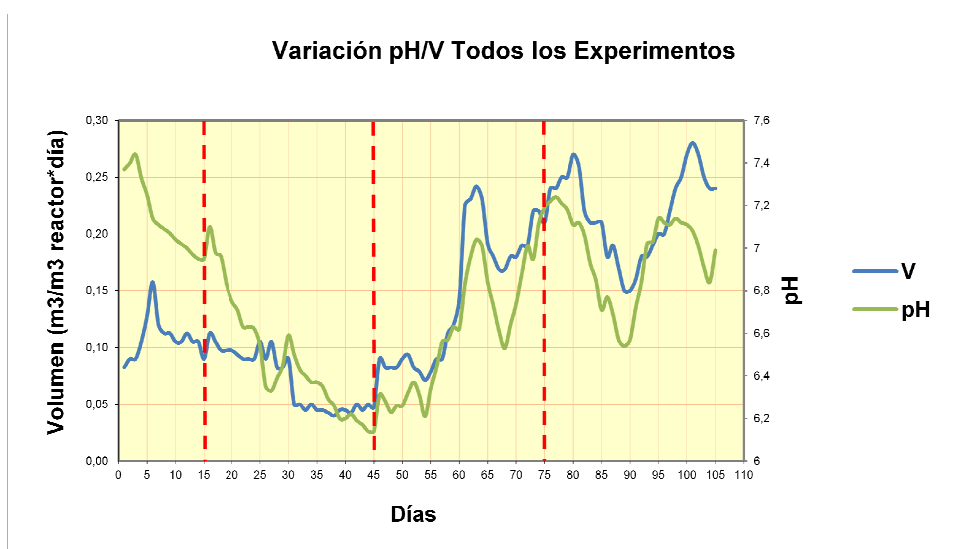


Figura 57: Relación pH/Volumen gas producido

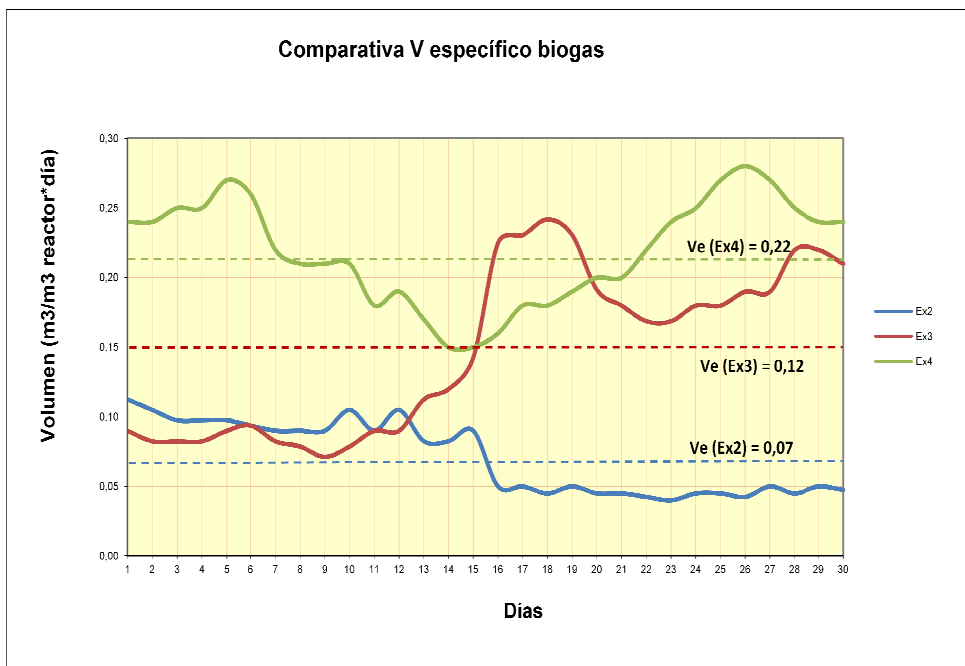


Figura 58: Valores medios de volumen específico del gas producido

	pH	V <sub>espec</sub> (m3/m3 reactor*día)	V <sub>espec masa</sub> (m3/kg estiercol*día)	V <sub>total</sub> (l/día)
Ex1	7,14	0,11	0,30	0,54
Ex2	6,47	0,07	0,20	0,35
Ex3	6,63	0,15	0,41	0,74
Ex4	6,97	0,22	0,61	1,10

Tabla 27: Resultados finales pH- Volumen biogás producido

Analizando estos valores observamos claramente como existe una correlación directa entre la producción de biogás y el valor del pH, concluyendo que la producción de biogás será mayor cuanto más cerca nos encontremos de la neutralidad (pH = 7).

Como podemos comprobar en las gráficas de seguimiento de nuestros experimentos, en el momento en el que los valores de pH se alejaban de 7, la tendencia de producción de biogás bajaba también, y cuando nos acercamos a la neutralidad, la producción aumentaba. Por otro lado, no se llegaron a alcanzar valores por debajo de 6 ni por encima de 8, por lo que en todo momento nos mantuvimos dentro del rango óptimo de pH.

### **Eficacia en la eliminación de la materia orgánica y contaminantes del sustrato digerido:**

En lo que respecta a las eficiencias de remoción del biodigestor, los valores obtenidos han sido los siguientes:

Eficiencia remoción	DQO	Ortofosfatos ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )	Fósforo total ( $\text{PO}_4$ )	Nitrógeno total (TNb)
Experimento 1	57,2%	44%	42%	54%
Experimento 2	63,0%	50%	48%	65%
Experimento 3	64,7%	57%	57%	68%
Experimento 4	68,9%	65%	66%	76%

Tabla 28: Resultados finales remoción DQO, P y N

Comparándolo con los valores de referencia obtenidos de la literatura, podemos comprobar que los resultados obtenidos son bastante satisfactorios, aunque ligeramente por debajo de los valores de referencia. De nuevo observamos como cuando realizamos el experimento a mayor temperatura, obtenemos mejores resultados de eficiencia en la remoción.

### **Calidad y cantidad del biogás obtenido:**

En lo referente a este apartado, se han analizado tres puntos fundamentales:

- El volumen de biogás producido respecto a la cantidad de sustrato utilizado
  - La composición del biogás producido
  - El poder calorífico del biogás.
- Volumen de biogás

Los resultados obtenidos han demostrado que la cantidad de biogás producida en el biodigestor está relacionada de manera directa con la temperatura de la digestión, así como con el pH. Este aspecto ya se ha comentado anteriormente en las conclusiones por lo que no se insistirá más en ello.

Por otro lado, a la vista de los datos que se exponen en la tabla siguiente, podemos comprobar que los resultados obtenidos en el biodigestor se asemejan mucho a los casos que podemos encontrar en la literatura, aunque con unos valores ligeramente más bajos. Esto podría ser debido a la existencia de pequeñas fugas en el sistema, o quizá debido a que en todo momento hemos estado utilizando un estiércol que no es fresco, ya que aunque se conservó bien cerrado y refrigerado, siempre se va a producir una degradación del mismo que en un entorno agrario en el que tenemos producción de estiércol diaria, no se produciría.

	$V_{\text{espec}}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ reactor*día)	$V_{\text{espec masa}}$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ estiércol*día)	$V_{\text{total}}$ (l/día)
Ex1	0,11	0,30	0,54
Ex2	0,07	0,20	0,35
Ex3	0,15	0,41	0,74
Ex4	0,22	0,61	1,10

Tabla 29: Resumen promedios biogás producido

En el apartado teórico (Apartado 1) ya se expusieron los valores típicos obtenidos para distintos tipo de biodigestores anaerobios (Tabla 5: Comparativa tecnologías digestión anaerobia), que se encontraban en el rango promedio de 0,2 - 0,6 ( $\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3$  biodigestor\*día) de volumen específico de biogás producido. Por tanto, vemos que, aunque nuestros valores promedio son inferiores, se encuentran dentro de lo esperado teóricamente, y se pueden considerar como satisfactorios.

- Composición del biogás

En este caso, los resultados muestran que la composición del biogás depende sobre todo del pH, ya que se observó que, a medida que el pH se estabilizó con el paso de los días, los porcentajes de cada uno de los componentes de biogás también se estabilizaron.

Solamente se observó una variación importante en los experimentos 1, y 2, en los que encontramos valores de pH más alejados de la neutralidad.

En la siguiente figura se aprecia claramente este hecho:

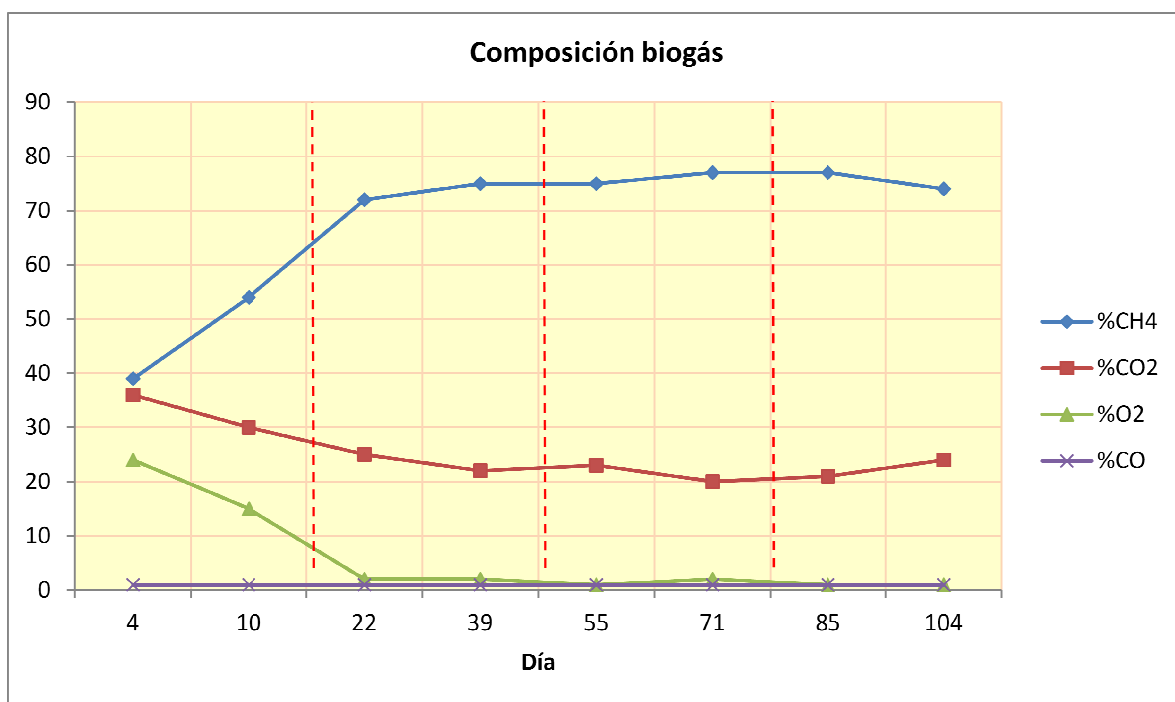


Figura 59: Composición biogás

Por otro lado, en lo referente a la temperatura, se observó que para temperaturas a partir de 30°C (Experimentos 3 y 4) la variación en la composición es prácticamente inapreciable, por lo que la conclusión es que la influencia de la temperatura en la composición no es directa, sino que está más relacionada con la influencia de ésta sobre el pH, y éste sobre la composición.

En lo que respecta a los valores de composición obtenidos, observamos que los valores son satisfactorios, y entran dentro de lo esperado:

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
%CH <sub>4</sub>	46,5	73,5	76	75,5
%CO <sub>2</sub>	33	23,5	21,5	22,5
%O <sub>2</sub>	19,5	2	1,5	1
%CO	1	1	1	1

Tabla 30: Composición promedio del biogás

- Poder calorífico del biogás

Ya se analizó en mayor profundidad en el apartado correspondiente lo referente al poder calorífico del biogás. Simplemente concluir diciendo que el valor medio de PCI obtenido en los experimentos, de valor 5272,11 kcal/m<sup>3</sup>, es un valor satisfactorio que se encuentra dentro de los valores típicos para el PCI de un biogás obtenido en biodigestor anaerobio (4000-6000 kcal/m<sup>3</sup>).



## 7. BIBLIOGRAFÍA

### Estudios:

- “Tratamiento de aguas residuales” J. Angulo Aramburu; SENER, Grupo de Ingeniería, S.A., Enero 2004.
- “Biodigestor de polietileno: construcción y diseño” ; CEDECAP, Abril 2007
- “Tecnología en Marcha”, Vol. 23, N.º 1, Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad; Rivas Solano, Olga; Faith Vargas, Margie; Guillén Watson, Rossy, Enero-Marzo 2010.
- “Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás”, PSE Probiogás, Ministerio de ciencia e innovación, M<sup>a</sup> Antonia Morís, Herminio Llana, Lola González Azpíroz, Elisabet González; Marzo 2010.
- “Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros”, Javier Andrés Pérez Medel; Marzo 2010
- “Efecto del biodigestor plástico de flujo continuo en el tratamiento de aguas residuales de establos bovinos”, Julián Estrada, Germán Gómez-Londoño, Alberto Jaramillo-Jiménez; Septiembre 2008.
- “Comparación entre la digestión anaerobia mesofílica y termofílica de lodos de depuradora”, V.Riau, M.A de la Rubia, T. Forster-Carneiro, M. Pérez, Universidad de Cádiz; Año 2007.
- “Codigestión anaeróbica de estiércol y lodos de depuradora para producción de biogás”, Karina García Amado, Noviembre 2009.

### Publicaciones:

- “Biomasa: digestores Anaerobios”, Energías renovables, Energía de la biomasa, Ministerio de Industria, turismo y comercio; Instituto para la diversificación y ahorro de la energía; Octubre 2007.
- “Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales”, Producción de gas y saneamiento de efluentes, Antonio Guevara Vera; CEPIS, Año 1996.
- “Digestión Anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos – El caso Perú” Laura Jarauta Rovira, Junio 2005.
- “Abonos orgánicos”, Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, Dr. Antonio Trinidad Santos.
- “Digestión anaerobia: Factores ambientales e inhibición”, Máster Microbiología: Tratamiento biológico aguas residuales, José L. Sanz.
- “Rumen y biogás”, Microbiología Agrícola, Leonor carrillo, Año 2003
- “Renewable Energy & Environmental in Formation Network” Año 2004, Obtenido de [www.reein.org](http://www.reein.org)



---

### Revistas:

- “Arranque de un reactor anaerobio”, José pacheco/ Aldo Magaña; Ingeniería revista Académica, Universidad autónoma de Yucatán; Enero-Abril 2003.
- “La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales”, Revista internacional de contaminación ambiental, año/volumen 16, número 001, Universidad Nacional Autónoma de México, Año 2000.
- “Estudio de las condiciones de operación para la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos”, revista colombiana de biotecnología Vol V, N0. 2 Diciembre 2003; Édgar Fernando Castillo, Diego Edison Cristancho, Victor Arellano.

### Normativa:

- “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, Part 9000 Microbiological Examination; © Copyright 1999 by American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation